

RESUM

En aquest projecte final de carrera es pretén realitzar un estudi aerodinàmic d'un edifici singular. Es tracta de la famosa *Torre Agbar de Barcelona*, que donades les dimensions, geometries i l'actualitat de l'obra, és sens dubte un edifici singular de la ciutat.

L'estudi tracta de la realització mitjançant eines informàtiques "CDF" (*Computer Fluid Dinàmics*) per a la determinació del camp fluidodinàmic de pressions i velocitats i els esforços, que permetran calcular els coeficients aerodinàmics (resistència a l'avanç).

Per dur a terme aquest estudi prèviament s'ha buscat el programa de simulació adient per a aquest tipus de càlculs. És el programa *Tdyn* que treballa conjuntament amb el *GiD*. Primer s'ha après el seu funcionament amb altres figures i exemples, per després poder calcular sobre la geometria d'estudi. S'ha creat una geometria molt complexa en 3D, la qual s'ha hagut de seccionar a una alçada determinada per convertir la geometria en 2D. A partir d'aquesta secció, s'han aplicat tota una sèrie de computacions necessàries per tal de poder-li aplicar un flux d'aire de 100Km/h i calcular així les velocitats als contorns, pressions, etc.

S'han estudiat cinc casos diferents aplicant vent en diferents angles, per poder determinar la direcció del vent més desfavorable.

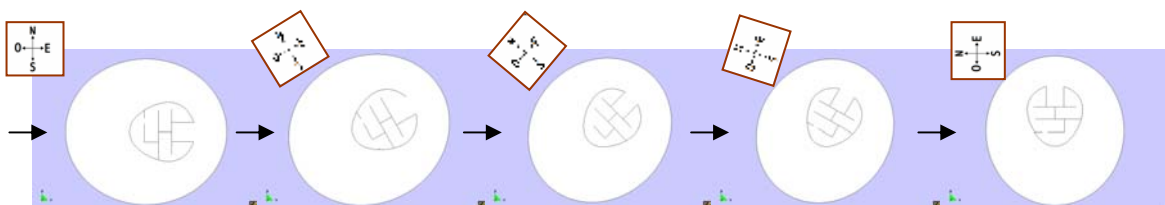


Figura 1: Les cinc seccions estudiades, on la fletxa simula la direcció del vent.

Calculades la força de resistència a l'avanç (F_d) i l'àrea frontal (A), obtenim com a resultats els següents coeficients de resistència a l'avanç (C_d) i les pressions màximes en els punts d'estancaments:

	F_d (N)	A (m ²)	$P_{m\grave{a}x}$ (Pa)	C_d
CAS 1	12980,4	33,89	492,99	0,835
CAS 2	13397,9	34,92	463,99	0,836
CAS 3	13690,5	35,62	461,84	0,838
CAS 4	13191,6	36,84	387,6	0,78
CAS 5	20488,3	37,88	487,96	1,179





SUMARI

1 GLOSSARI.....	6
2 PREFACI.....	7
3 INTRODUCCIÓ.....	9
4 CONSIDERACIONS PRÈVIES.....	11
4.1 <i>TORRE AGBAR DE BARCELONA</i>	11
4.2 OBJECTIUS DEL PROJECTE.....	21
4.2.1 Cerca i familiarització del programa de simulació.....	21
5 REALITZACIÓ DE LA SIMULACIÓ EN 2D MITJANÇANT EL PROGRAMA TDYN...	29
5.1 INTRODUCCIÓ.....	29
5.2 CREACIÓ DE LA GEOMETRIA.....	30
5.3 CONDICIONS DE CONTORN.....	44
5.3.1 Fixar pressió.....	44
5.3.2 Fixar velocitat.....	45
5.3.3 Fixar vector velocitat.....	45
5.3.4 Fixar camp de pressions.....	46
5.3.5 Fixar camp de velocitat.....	46
5.4 PROPIETATS I CONTORN DEL FLUID.....	48
5.4.1 Propietats del fluid.....	48
5.4.2 Contorn del fluid: Fluid Body.....	53
5.5 DEFINICIÓ DEL PROBLEMA.....	57
5.6 MODELS DE TURBULÈNCIA.....	59
5.6.1 Laminar.....	59
5.6.2 Mixing_Length	59
5.6.3 Smagoriynsk.....	60
5.6.4 Models d'una equació cinètica "k": Kinetic_Energy, Energy Two_Layers i Spalart_Allmaras.....	60



5.6.5 Models de dues equacions k- ϵ E_High_Rynolds, K_E_Two_Layers _E_Lam_Bremhorst i K_E_Launder_Sharma.....	61
5.6.6 Models de Reynolds Share-Strss-Model (SST): K_Omega I Omega_SST.....	63
5.6.7 Model escollit per l'estudi aeroodinàmic.....	64
5.7 OPCIONS GENERALS DEL PROGRAMA TDYN.....	66
5.7.1 La definició de simetries.....	66
5.7.2 Definició de gravetat.....	66
5.7.3 Opcions de pressió.....	66
5.7.4 Definició de les unitats.....	66
5.8 GENERACIÓ DE LA MALLA.....	67
5.8.1 Lineal.....	67
5.8.2 Quadràtica.....	67
5.8.3 Quadràtica modificada.....	68
5.9 OPCIONS DEL SOLUCIONADOR: SOLVER.....	72
5.9.1 Ftime Integrator.....	72
5.9.2 NS1 tolerance.....	72
5.10 NORMES DE CONVERGÈNCIA.....	74
5.11 ANÀLISIS I VISUALITZACIÓ DE RESULTATS.....	75
5.11.1 Resultats de la simulació del perímetre inicial: Cas 1.....	77
5.11.2 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 30 graus: Cas 2.....	85
5.11.3 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 45 graus: Cas 3.....	87
5.11.4 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 60 graus: Cas 4.....	89
5.11.5 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 90 graus: Cas 5.....	91
5.12 RESULTATS SIMULACIÓ 2D.....	94
6 PROVA D'UNA SIMULACIÓ EN 3D.....	97
6.1 CREACIÓ DE LA GEOMETRÍA EN 3D.....	97
6.2 PROPIETATS I CONTORN DEL FLUID.....	99
6.3 GENERACIÓ DE LA MALLA EN 3D.....	102



6.4 RESULTATS OBTINGUTS EN 3D.....	104
7 PRESSUPOST.....	107
CONCLUSIONS I RECOMANACIONS.....	111
BIBLIOGRAFIA.....	115



1 GLOSARI

ρ : Densitat

c: Velocitat

dA: Diferencial d'Àrea

dV: Diferencial de Volum

VC: Volum de Control

SC: Superfície de Control

F: Força

P: Pressió

Q: Cabal

Re: Reynolds = (Forces d'inèrcia / Forces viscoses)

Eu: Euler = (Forces de pressió / Forces d'inèrcia)

C_D: Coeficient de resistència a l'avanç o DRAG

K: "Eddy Kinetic" [m^2/s^2]

TIL: Nivell de Turbulència

CDF: *Computer Fluid Dynamics*

SST: *Share-Stress-Model*



2 PREFACI

En aquest projecte final de carrera es pretèn realitzar un estudi aerodinàmic d'un edifici singular: la famosa *Torre Agbar de Barcelona*.

Cal esmentar que l'abast d'aquest projecte es limitarà únicament a aspectes aerodinàmics. No s'incidirà ni en qüestions estructurals, ni materials o altres matèries associades.



3 INTRODUCCIÓ

Aquest projecte final de carrera pretén realitzar un estudi fluidodinàmic d'un edifici singular. S'ha escollit com a edifici la famosa *Torre Agbar de Barcelona*, doncs donades les dimensions, geometries i l'actualitat de l'obra, és sens dubte un edifici únic de la ciutat de Barcelona.

Per dur a terme aquest estudi s'ha escollit el programa *Tdyn*, que conjuntament amb el *GiD*, s'adeqüen perfectament a les necessitats. Prèviament s'ha après el seu funcionament i s'han realitzat diversos exemples semblants, els quals també seran explicats.

S'ha generat una geometria en 3D de la *Torre* a partir d'un plànol inicial proporcionat per l'empresa *b720*. Aquesta geometria d'estudi s'ha seccionat, convertint-la en una figura en 2D, amb la que es treballarà.

Se li ha aplicat un vent en diferents direccions a una velocitat d'uns 100Km/h, o exactament 28m/s, donant la simulació el camp fluidodinàmic de pressions i velocitats, que posteriorment s'explicaran en detall. Amb aquestes dades s'ha calculat el coeficient de resistència a l'avanç per les diferents configuracions d'incidència del vent sobre la secció d'estudi.

S'ha provat també realitzar aquesta mateixa simulació en 3D, però no s'ha arribat a cap resultat coherent. Igualment s'han exposat totes aquestes simulacions i els resultats obtinguts.



4 CONSIDERACIONS PRÈVIES



4.1. **TORRE AGBAR DE BARCELONA**

En aquest punt es pretén introduir, explicar i mostrar el què la *Torre Agbar de Barcelona* és, el què serà i quins són els seus orígens.



La *Torre Agbar* està inspirada en les sòlides formes de Montserrat. A l'igual que el mític monument natural català, el nou edifici emergeix de la terra per assolir l'infinit i es converteix en el nou referent d'una ciutat cosmopolita i internacional que no perd, per això, ni la seva identitat ni els seus orígens.





Basant-se en la naturalesa, la superfície de l'edifici evoca l'aigua, de textura llisa i contínua, vibrant i transparent. Erigida amb un material acolorit, lluminós i matisat. Una arquitectura que procedeix de la terra per alçar-se fins allò inabastable i convertir-se així en el nou símbol d'una metròpolis internacional i en una de les seves ambaixadores.

La *Torre Agbar* s'uneix al cel gràcies al recobrint que dóna color a tot el conjunt. Una superfície de colors difuminats composta per milers de làmines de vidre, que cobreixen a mode de para-sol tota la superfície emergent de l'edifici.



La *Torre Agbar* es constitueix com la futura porta del *Fòrum 2004* a la Diagonal, al costat de la plaça de les Glòries, un punt clau. El *Fòrum Universal de les Cultures* és la primera edició d'un esdeveniment multitudinari i d'abast internacional que reunirà a la ciutat de Barcelona persones arribades de tot el món.



Jean Nouvel, el creador d'aquesta obra, és una de les grans figures internacionals de l'arquitectura urbanística mundial i està considerat com l'arquitecte francès de més projecció internacional.



Nouvel va néixer a Fumel, França, el 1945. El 1972 va obtenir el títol d'arquitecte i el 1976 va ser uns dels fundadors del moviment d'arquitectes francesos denominats *Mars 1976*. També va ser cofundador del *Syndicat de l'Architecture* i un dels principals organitzadors del concurs internacional per al districte Halles a París.

El 1980 es va convertir en el fundador i assessor artístic de la Biennal d'Arquitectura de París i, tres anys després, va obtenir el nomenament de *Chevalier d'Ordre des Lettres et de Arts*. En aquest mateix any, se li va concedir la Medalla d'Argent de l'Académie d'Architecture i el títol Honoris Causa per la Universitat de Buenos Aires.

El 1987 se'l va nomenar *Chevalier de l'Ordre du Mérite*. Va ser durant aquesta mateixa època, quan va guanyar el *Grand Prix d'Architecture*, va obtenir un esment especial del *Premi Aga Khan* i l'*Equerre d'Argent* (premi al millor edifici francès) pel projecte de l'edifici corresponent a l'Institut del Món Àrab. Posteriorment, l'any 1990 va rebre el *Premi Architectural Ràcord* per l'Hotel Saint James i en el 1993 va tornar a aconseguir l'*Esquerre d'Argent* per l'edifici de l'Opera de Lyon.



Ha rebut nombrosos reconeixements: membre honorari del *Royal Institute of British Architects* el 1995 i *Commandeur de l'Ordre des Arts et des Lettres* el 1997. A més a més, va rebre la Medalla d'Or de l'*Académie d'Architecture* el 1999 i el Lleó d'Or de la Biennal de Venècia en el 2000.

L'arquitectura de *Nouvel* es caracteritza per un joc entre la llum i la matèria. En la majoria dels seus edificis, *Nouvel* introdueix les idees de transparència, tecnologia, clarobscur, velocitat i reflexos, i dissenya figures abstractocubistes que impulsen l'arquitectura moderna cap a un futurisme monumental.

Entre les seves obres més reconegudes es troben l'Institut del Món Àrab de París, la rehabilitació de l'Òpera de Lyon, el Palau de Congressos de Tours, la Fundació Cartier de París i el Centre Cultural de Lucerna.

Des de llavors, ha continuat sorprenent en l'àmbit Internacional, aconseguint importants projectes com la realització del Museu Nacional Centre d'Art Reina Sofia de Madrid i actualment, presenta el projecte de la *Torre Agbar* a Barcelona, la seva segona obra en el nostre país.



Per al despegament del projecte de la *Torre Agbar*, *Jean Nouvel* ha confiat en l'equip d'arquitectes de la signatura *b720*.

b720 és un estudi d'arquitectura format per un equip d'arquitectes amb excel·lents historials professionals i acadèmics. Va ser fundat el 1997 per Fermín Vazquez, Adriana Plasencia i Anna Bassat.



El nom de la signatura reflecteix l'actitud fundacional de preeminència de l'obra enfront del seu autor. Les sigles *b720* fan referència, de manera abstracta, a la ciutat i a l'arquitectura.

Molt recentment, s'han acabat les seves primeres obres visibles en espais urbans de Barcelona: dos edificis d'habitatges situats a la Rambla de Catalunya i a la Gran Via de les Corts Catalanes.

En l'actualitat, a més de la *Torre Agbar*, *b720* col·labora amb *Jean Nouvel* en la redacció del projecte d'ampliació del Museu Centre d'Art Reina Sofia a Madrid i en l'avantprojecte presentat a concurs per la nova terminal de l'Aeroport de Barcelona.

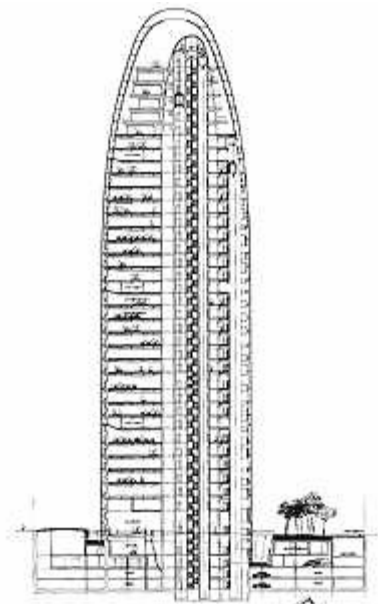


b720 també col·labora amb David Chippelfield, arquitecte de gran prestigi internacional, en un projecte d'oficines singulars a Barcelona i en el concurs restringit per al nou auditori i centre de congressos de Vigo.

A hores d'ara, l'estudi està treballant en diversos projectes a Barcelona: un edifici d'oficines, un centre de formació i un conjunt d'habitatges.

b720 està liderat per Fermín Vazquez, que és responsable de la seva línia arquitectònica tant a escala teòrica com en l'aplicació pràctica dels projectes en curs. Ha desenvolupat gran part de la seva carrera professional en la docència com a professor de la Càtedra Mies, a l'*Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona*.

La *Torre Agbar* neix de la unió de dos conceptes totalment oposats: la lleugeresa del vidre i la massivitat del formigó.



Es tracta d'una estructura travessada per milers de forats i finestres, la missió de la qual és ser el pont de la llum entre l'exterior i l'interior del cilindre ovoidal. Una capa protectora de



vidre cobreix la pell del formigó i una fina capa de llàmines d'alumini tintades dóna el toc de color al dolmen de vidre.

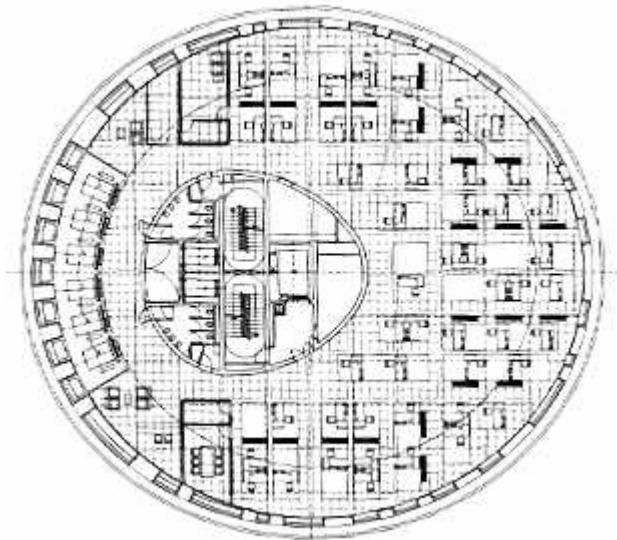


El formigó i la doble pell, dissenyada seguint uns criteris bioclimàtics, formen un matalàs tèrmic que aïlla el fred a l'hivern i la calor a l'estiu. Està dissenyada específicament per a Barcelona.

D'un caràcter d'aigua emergeixen dos cilindres de formigó, no concèntrics i ovoides, fins a la planta 26. Han estat perforats aleatòriament per crear milers de finestres que recorden un fractal. Per sobre d'aquesta planta, ja comença a erigir-se una cúpula lleugera de vidre i acer.



El cilindre interior alberga les escales, instal·lacions i ascensors especials, i entre l'interior i el cilindre exterior, es troba l'espai de treball, lliure i sense pilars. Adossats al perímetre es disposen els sis ascensors generals, des dels quals els usuaris podran veure Barcelona.



La capa de formigó és l'alumini que dona color a tota la torre. Una superfície de colors que es difuminen en 16.000m². Un total de 4000 finestres, de 90x90cm, distribuïdes irregularment per tot el cilindre, trenquen la unitat cromàtica del formigó. És la capa de vidre la protectora de la silueta.



Són milers de làmines de vidre de 120x30cm, algunes transparents i altres translúcides, que cobreixen a manera de para-sol, tota la superfície emergent de l'edifici. Totes elles tenen distintes inclinacions segons la seva posició per tolerar més o menys insolació. Una passarel·la en cada planta, entre les dues pells, permet el seu manteniment.

Actualment, ja s'ha començat la fase final del projecte. S'estan col·locant les plaques de colors que van tocant a l'estructura de la *Torre* i seguidament es posaran els vidres exteriors. Aquestes plaques de colors imiten un guèiser. Els colors aniran des dels vermells a la part més baixa fins al blau a la part més alta. De fet, hi han 40 gammes de color diferents, les quals es difuminaran amb l'alçada.





Inicialment, la finalització de l'obra estava prevista pel primer semestre de 2004, la qual s'ha retrassat. L'actual previsió calcula que es finalitzi la part exterior entre els mesos de Setembre i Octubre; la part interior encara està per definir doncs la mateixa empresa Aigües de Barcelona farà amb els seus propis dissenyadors tot l'interior per als 30 000 m² d'oficines.



4.2 OBJECTIUS DEL PROJECTE

L'objectiu d'aquest projecte és, a part de familiaritzar-se amb el programa de simulació, crear una superfície d'anàlisi de la *Torre Agbar de Barcelona*, a partir de la qual poder fer un estudi fluidodinàmic, calculant el coeficient resistència a l'avanç en 2D de la *Torre*.

Es pretén determinar la distribució de pressions al voltant d'aquesta superfície i veure així quina pressió màxima hauria d'aguantar la estructura que subjecte totes les làmines exteriors de vidre.

Aquesta distribució de pressions es determinarà per diferents angles d'incidència, veient per a cada una les sol·licitacions màximes.

4.2.1 Cerca i familiarització del programa de simulació

Després d'analitzar el mercat i les diferents opcions dels programes existents s'ha escollit el programa *Tdyn* que treballa conjuntament amb el programa *GiD*. Aquest programa té nombroses avantatges vers a la competència o als programes més usuals: *Fluent*, *Numeca*, *Phoenix CDF*, *CFX*, etc.

- Aquest programa s'ha creat conjuntament entre la UPC i l'empresa *COMPASS Ingeniería y Sistemas S.A.* Hi han llicències gratuïtes per utilitzar-lo.
- És un programa que es pot instal·lar en un ordinador personal, sense necessitat de tenir un servidor. No requereix gran espai en quant a memòria.
- És un programa que adjunta una sèrie de tutorials per tal de dur a terme una autoformació. Aquests tutorials són bastant complets i suficients per a que, en poques hores, es puguin realitzar càlculs i simulacions de qualsevol índole.



- A part de ser un programa de simulació pròpiament, també es poden crear i dibuixar amb facilitat punts, línies, superfícies i volums, gràcies a que treballa conjuntament amb el *GiD*.
- Aquest programa té un molt bon servei personalitzat en cas de dubtes o aclaracions a través de la seva pàgina web: www.compassis.com.

Dins d'aquesta primera part de cerca del programa, s'ha dut a terme un procés d'autoformació. Primer s'han realitzat una sèrie d'exemples o tutorials del programa *GiD* per tal de dominar totes les eines que aquest programa disposa per a dibuixar, importar arxius de *CAD*, *Solid Works*, crear geometries, mallats, etc.

Gràcies a aquests tutorials s'ha aconseguit dominar totes les eines de dibuix, creant-ne alguns com els següents:



Figura 4.1: Superfícies creades amb el GiD.

Un cop dominades les principals eines de dibuix, s'ha prosseguit amb l'aprenentatge del mallat de qualsevol superfície. Creant diferents tipus de mallats tant tetraèdrics com quadràtics, fent-los de diferents tamanyos i formes en funció de les necessitats de l'exemple donat. Un exemple de mallat podria ser el següent:



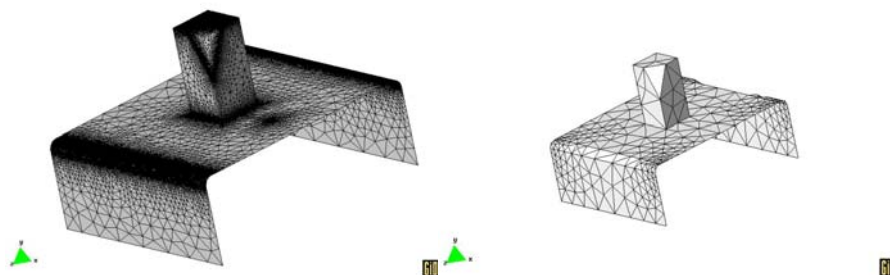


Figura 4.2: Diferents mallats per a una geometria donada

En aquest exemple es poden veure dos tipus de mallat diferents. El primer és el que el programa fa per defecte. En el segon s'han procurat mallar aquells punts o parts de més interès: com podrien ser els cantells, les unions o algun punt en concret.

Un cop dominades les principals eines i opcions del *GiD*, s'ha fet el mateix amb el programa *Tdyn*, intentant conèixer i aprendre amb la màxima cura el seu funcionament en 2D.

Aquest programa treballa amb la base del *GiD* però afegeix totes les opcions de càlcul necessàries per dur a terme un estudi de tipus fluidodinàmic. Qualsevol figura creada amb el *GiD*, se li pot dur a terme un estudi fluidodinàmic. En aquest programa també existeixen tutorials o exemples de simulacions, que evidentment també s'han realitzat per tal d'aprendre al màxim; com l'exemple següent:



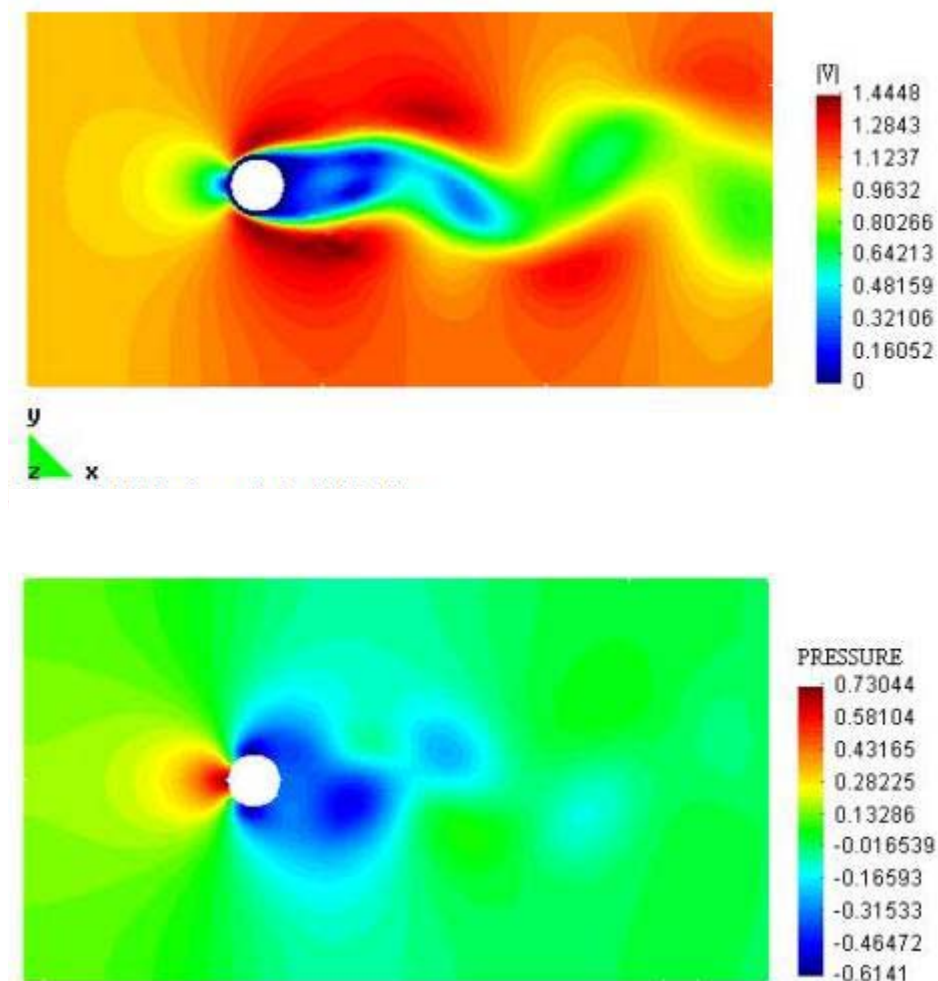


Figura 4.3: Distribució de velocitats i de pressions en 2D d'un cercle.

En aquest exemple, s'han pogut validar els resultats del programa amb dades ja existents, doncs es tracta de les distribucions de velocitats i de pressions d'un cilindre, figura àmpliament estudiada i coneguda.

En aquest exemple ja conegut de la circumferència, en cas d'estudi del flux potencial, la velocitat en els extrems superiors i inferiors, teòricament hauria de ser dos cops la V_∞ , així doncs en l'exemple: si la velocitat inicial es de 1m/s, la velocitat en els extrems hauria de ser 2m/s. Com la teoria de *Helmholz i Kirchhoff* que diu que un fluid real el punt de velocitat màxima és aproximadament de 1,5 vegades la velocitat infinit. En la pràctica, ens dona un valor de velocitat de 1,44m/s, que s'ajusta bé a les dades fins ara conegudes d'aquesta geometria.



Un cop realitzades simulacions fluidodinàmiques d'objectes amb resultats ja coneguts, per tal de verificar i validar els resultats del programa com a treball previ, s'ha realitzat una simulació i càlcul d'una lluminària de l'empresa *Carandini*. L'empresa es va posar en contacte amb el departament de fluids de l'ETSEIB, per dur a terme un càlcul. Aquesta és una empresa ja coneguda pels barcelonins, ja que dissenyen i fabriquen quasi totes les lluminàries que hi ha a Barcelona. En aquest cas en concret aquesta empresa estava interessada en el coeficient de resistència a l'avanç (C_D) d'una lluminària en concret: la coneguda com *denvermax*. Es tracta d'una lluminària formada per una base de tipus vertical, on a la part superior s'hi troben les bombetes des d'on s'emet la llum. Els aspectes tècnics en quant a computació estaran ampliat posteriorment en l'estudi aerodinàmic de la *Torre Agbar de Barcelona*.

En aquest cas s'ha partit d'un plànol en 3D en format *Solid Works*, el qual es va importar al programa *GiD*:



Figura 4.4: Imatge en 3D de la lluminària *denvermax* de l'empresa *Carandini*.

Seguidament s'ha agafat la secció en 2D més crítica en quant a resistència a l'avanç, quedant:



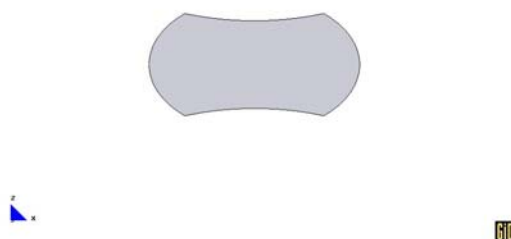


Figura 4.5: Secció transversal de la lluminària denvermax.

Un cop realitzat el tall horitzontal de la secció en 2D, s'ha passat ja al programa Tdyn2D, per tal d'aplicar-li un fluid i calcular la distribució de pressions al contorn. Per fer això prèviament s'ha hagut de crear una superfície per la que hi circuli un fluid, en aquest cas aire a 25°C. Quedant:

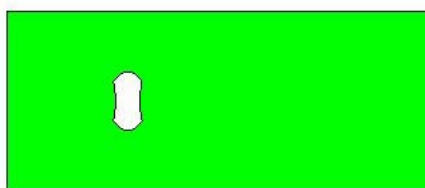


Figura 4.6: Superfície del fluid.

Aquesta superfície s'ha hagut de mallar, quedant:

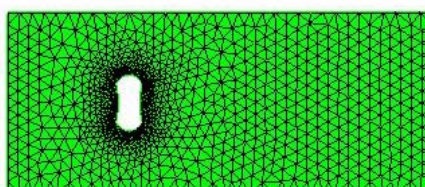


Figura 4.7: Mallat de la superfície del fluid, sent més dens al voltant de la geometria d'estudi.



S'ha fet un mallat diferent, el qual és més precís a la zona del contorn de la superfície d'estudi, que no a les parts més externes. S'han creat també unes condicions de contorn per a la superfície per tal que el programa doni uns resultats coherents, quedant:

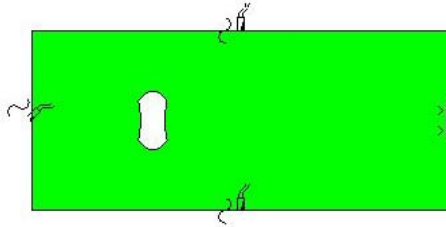


Figura 4.8: Condicions de contorn de velocitat i de pressió.

Com ja s'ha comentat anteriorment tots aquest aspectes tècnics seran explicats detalladament en l'estudi aerodinàmic de la *Torre Agbar de Barcelona*. Arribat aquest punt s'ha iniciat la simulació, fent incidir al contorn de la superfície d'estudi aire a 25°C a una velocitat de 100Km/h. El programa *Tdyn* té un sistema de post-procés molt complet i permet una visualització de resultats molt àmplia, que també serà explicada posteriorment. En aquest cas i per calcular el coeficient de resistència a l'avanç es parteix de la fórmula:

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho \cdot C_\infty^2 \cdot A}$$

Fórmula 4.1: Càlcul del coeficient de resistència a l'avanç C_d .



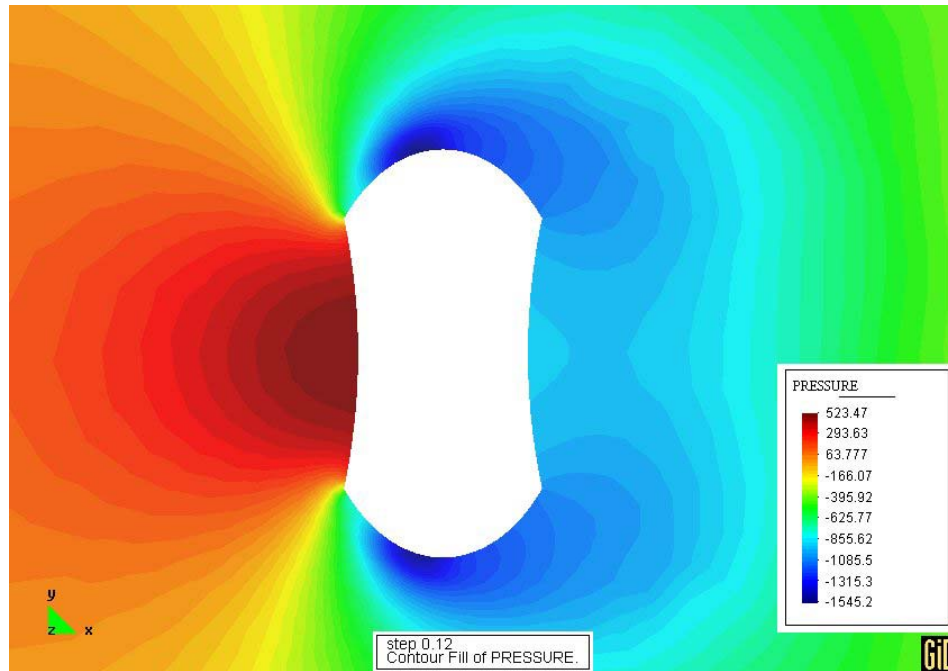


Figura 4.9: Distribució de pressions al contorn de la superfície d'estudi.

Necessitem integrar tota la distribució de pressions (F_d) respecte tot el perímetre de la superfície d'estudi. Aquest valor, el programa *Tdyn* també el pot calcular, quedant un valor de força en tot el perímetre de: $F_d = 224\text{N}$.

Així doncs aplicant aquest F_d a la *Fórmula 4.1*, s'ha pogut calcular el coeficient de resistència a l'avanç C_d quedant el valor:

$$C_d = 2,035$$

S'havia previst, un valor de C_d entre 1,7 i 2,2; comparant-lo amb geometries similars trobades a la referència [4], les quals ja han sigut prèviament estudiades. Així doncs reafirmem els resultats obtinguts.

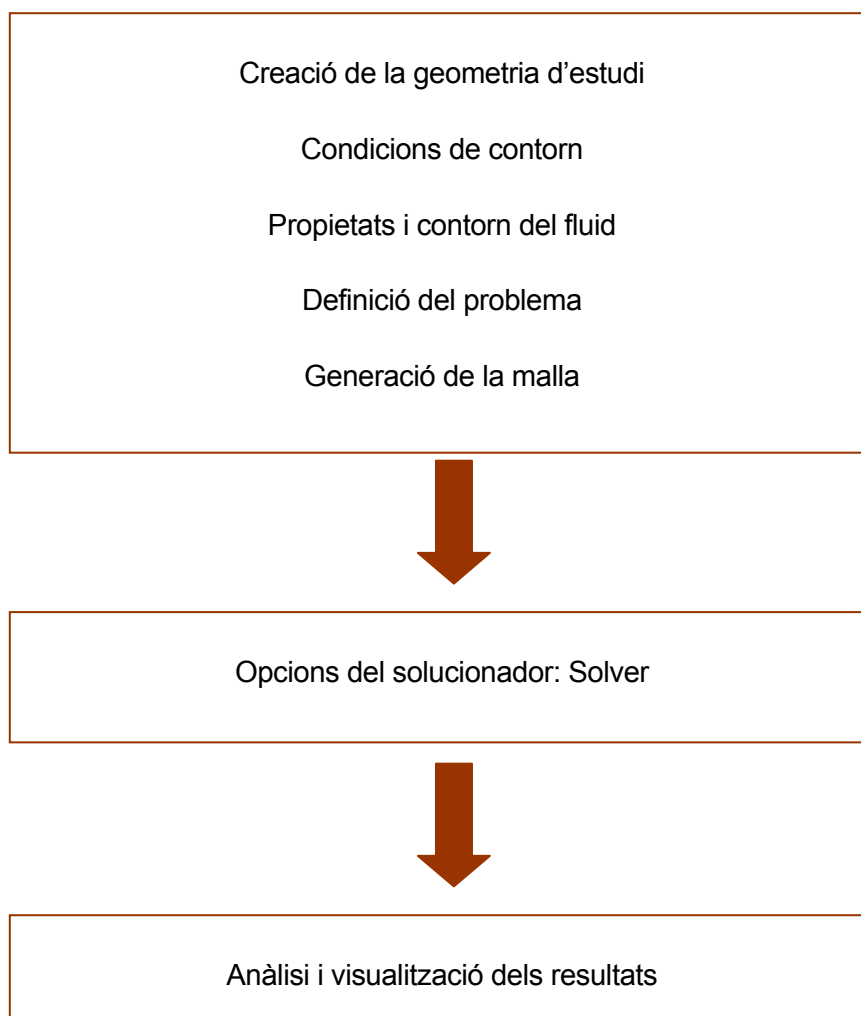
Un cop realitzat aquest càlcul i havent après el perfecte funcionament tant del programa *GiD* com del *Tdyn*, es pot començar amb l'estudi de la Torre Agbar de Barcelona.



5. REALITZACIÓ DE LA SIMULACIÓ EN 2D MITJANÇANT EL PROGRAMA TDYN

5.1 INTRODUCCIÓ

En aquest apartat s'explicarà el funcionament i la forma de crear i realitzar una simulació en 2D, seguint el següent esquema.



5.2 CREACIÓ DE LA GEOMETRIA



La geometria ha d'estar realitzada prèviament mitjançant un programa de disseny, com podria ser el *Solid Works* o qualsevol de dibuix utilitzat pels arquitectes; en aquest cas el GiD permet importar arxius en formats molt diversos com: *IGES*, *IGS*, *VDA*, *DXF*, *X_T*, *X_B*, *SAT*, etc.

L'operació d'importació de geometries pot tenir algunes complicacions, com és la interpretació que el *GiD* faci del disseny importat, podent quedar superfícies per definir, línies que es creuen en comptes de tallar-se o perdre punts prèviament definits entre d'altres. Si l'arxiu inicial prové del programa *Solid Works*, aquests problemes es poden solucionar parcial o totalment aplicant el mateix valor de tolerància al *GiD*. Igualment, un cop importat un arxiu al *GiD* existeixen opcions per tal de poder subsanar i corregir els errors.

Un altre error bastant freqüent és la diferència d'unitats entre l'arxiu originat i el definit pel *GiD*. Aquest error podria ocasionar una distorsió dels resultats obtinguts, la qual cosa s'ha de vigilar i comprobar, abans de realitzar qualsevol tipus de càlcul. El *GiD* també permet de forma fàcil definir les unitats originals del disseny, podent també variar l'escala.

En la creació de la geometria es generarà una superfície o volum de control, segons si es vol realitzar una simulació de 2D o 3D respectivament. El programa utilitzat disposa d'una eina de creació de geometries molt potent, siguin punts, superfícies a partir de línies o corbes, o la creació de volums a partir de superfícies diverses. Si la superfície i/o volum necessita, per raons de càlcul, simplifications el *GiD* també permet modificar o canviar qualsevol geometria.

En general no és convenient generar la superfície de control en el programa *Solid Works*, ja que depenent de la complexitat d'aquesta, pot fer molt complicat el procés d'importació, creant així un major nombre d'errors en la definició de les superfícies.



En el cas de la *Torre Agbar de Barcelona*, no ha estat gens fàcil trobar una geometria inicial de l'estructura. S'ha hagut de parlar directament amb l'empresa *Jean Nouvel* a Paris per demanar permís per obtenir la geometria desitjada. Inicialment aquesta era contrària a donar qualsevol tipus de plànol, secció o còpia en paper d'aquesta estructura, però després d'una sèrie d'e-mails i trucades directament amb la central a Paris, l'empresa va acceptar a ajudar en el que fos necessari, doncs entenia que es tractava de la realització d'un estudi que fins al moment encara no s'havia fet complet, simplement de manera parcial. Així que, van donar l'adreça del cap d'obra de l'empresa *b720* que es troba a Barcelona, i que molt amablement va accedir i va proporcionar dades de la geometria original per tal de poder-la crear i utilitzar-la en aquest estudi.

Seguidament, s'ha dut a terme la creació d'aquesta geometria quedant una figura en 3D composta per 3270 superfícies. Evidentment aquest procés ha estat lent i laboriós. La gran quantitat de superfícies d'aquesta *Torre*, aparentment simple, ha obligat a realitzar moltes correccions, per tal de que el volum i les superfícies quedessin ben definides després de la creació. Tal i com s'ha comentat prèviament, es tracta d'un procés difícil i lent.

Després de la creació, ha quedat la següent figura en 3D:



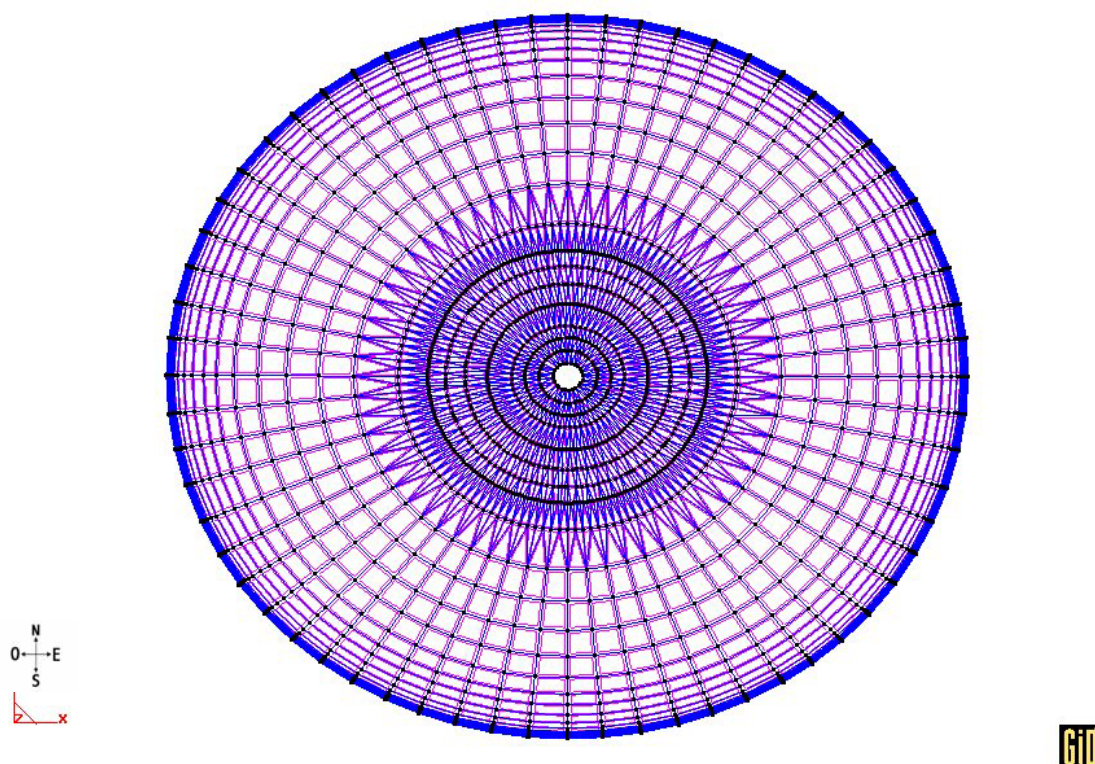


Figura 5.1: Vista en planta X-Y.

En aquesta vista en planta es pot veure la gran complexitat que la *Torre Agbar de Barcelona* té; el plànol original té més de 3200 superfícies. El major número de superfícies el trobem a la part superior de la *Torre*, on es concentren unes 1500 superfícies tal com mostra la següent figura.



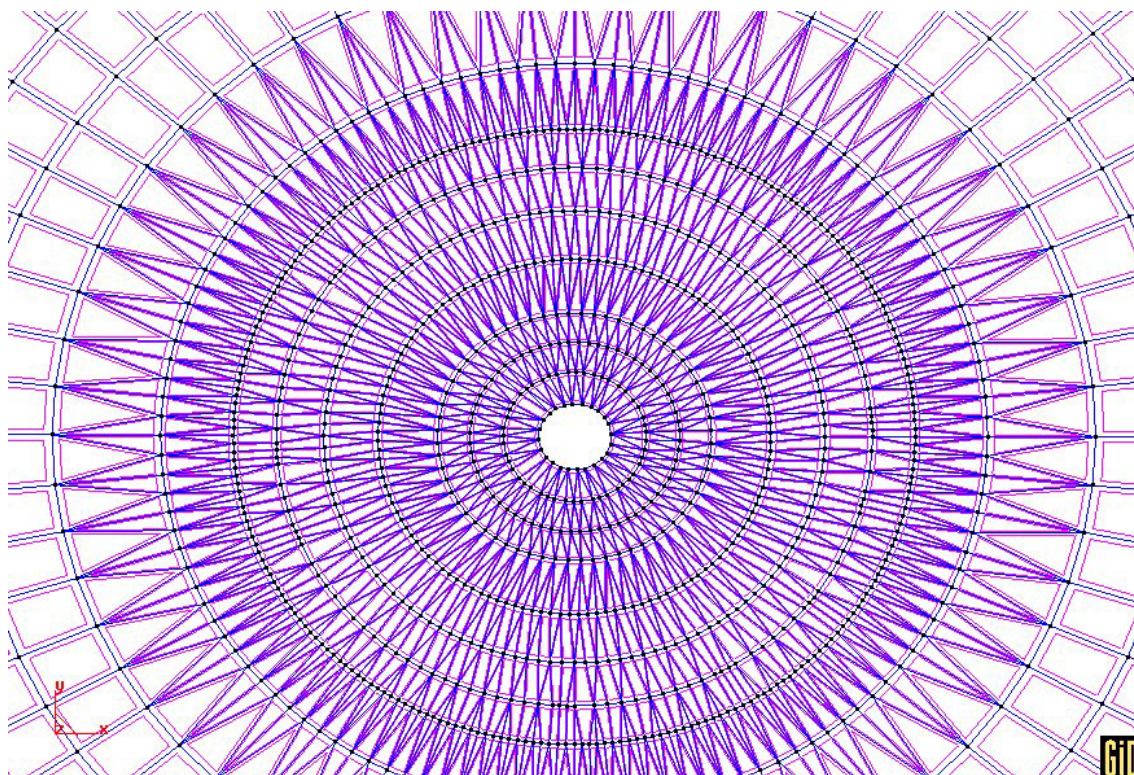


Figura 5.2: Secció en planta X-Y, on es poden apreciar el gran número de superfícies.

El programa *GiD* permet veure les superfícies també en un altre format denominat: *flat lighting*.



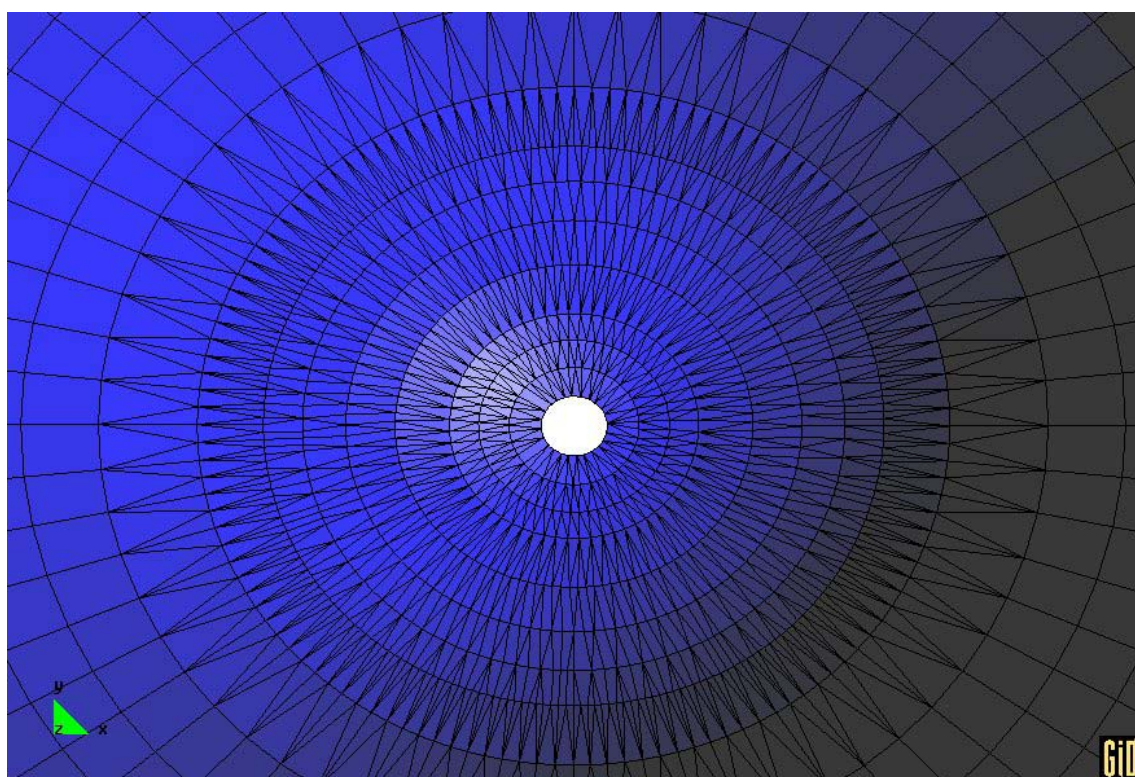
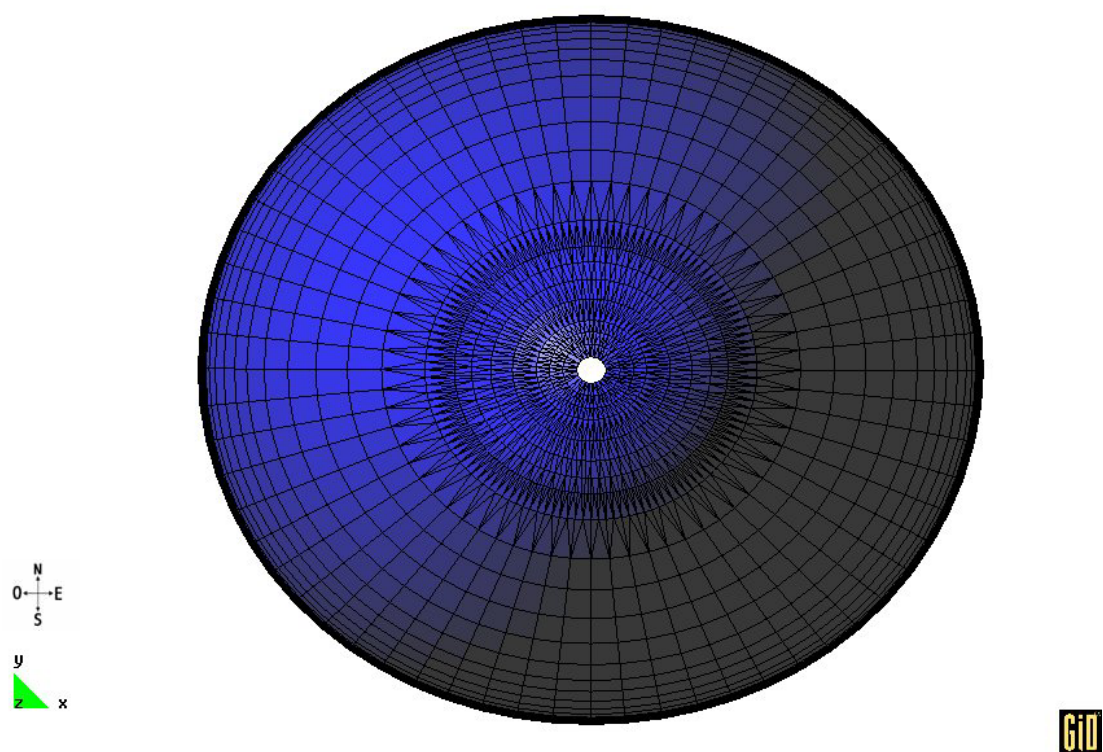


Figura 5.3: Seccions en planta X-Y, flat lighting.



Observant les figures anteriors, es pot apreciar que la vista en planta de la *Torre Agbar de Barcelona*, no és circular, sinó que s'assimila a una el·lipse, formada per una gran quantitat de rectes. Si ens mirem el mateix disseny en els eixos X-Z tan en la cúpula com en l'alçada sencera, trobem:

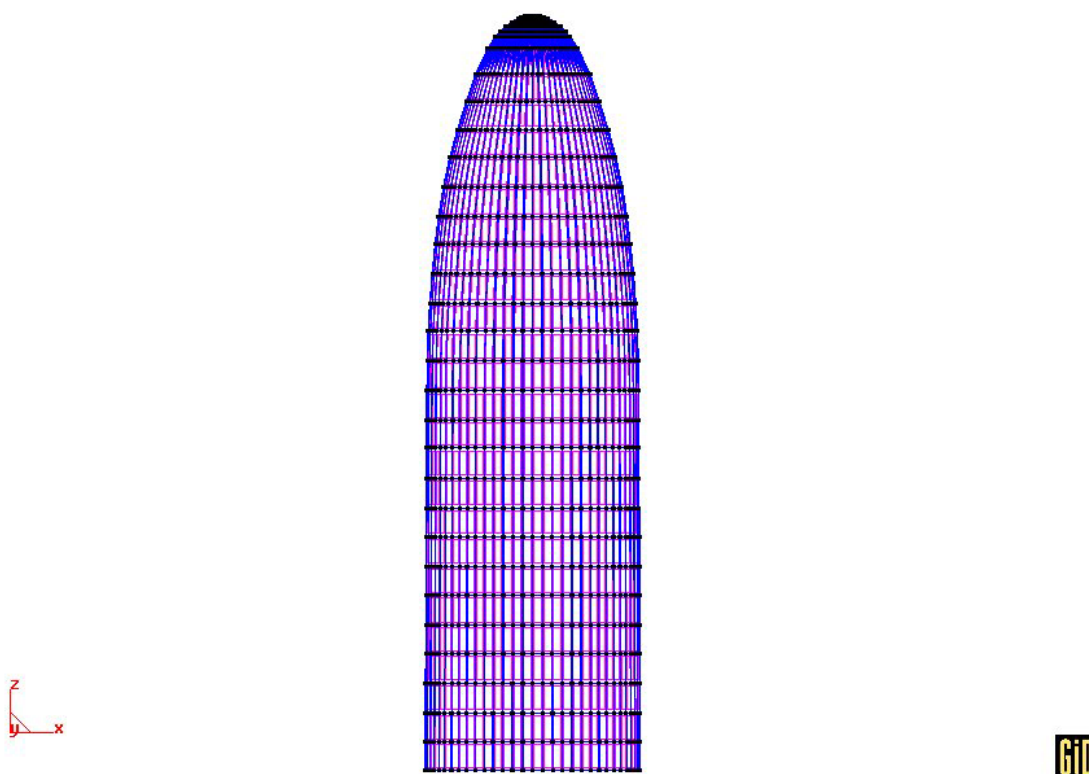


Figura 5.4: Vista eixos X-Z.



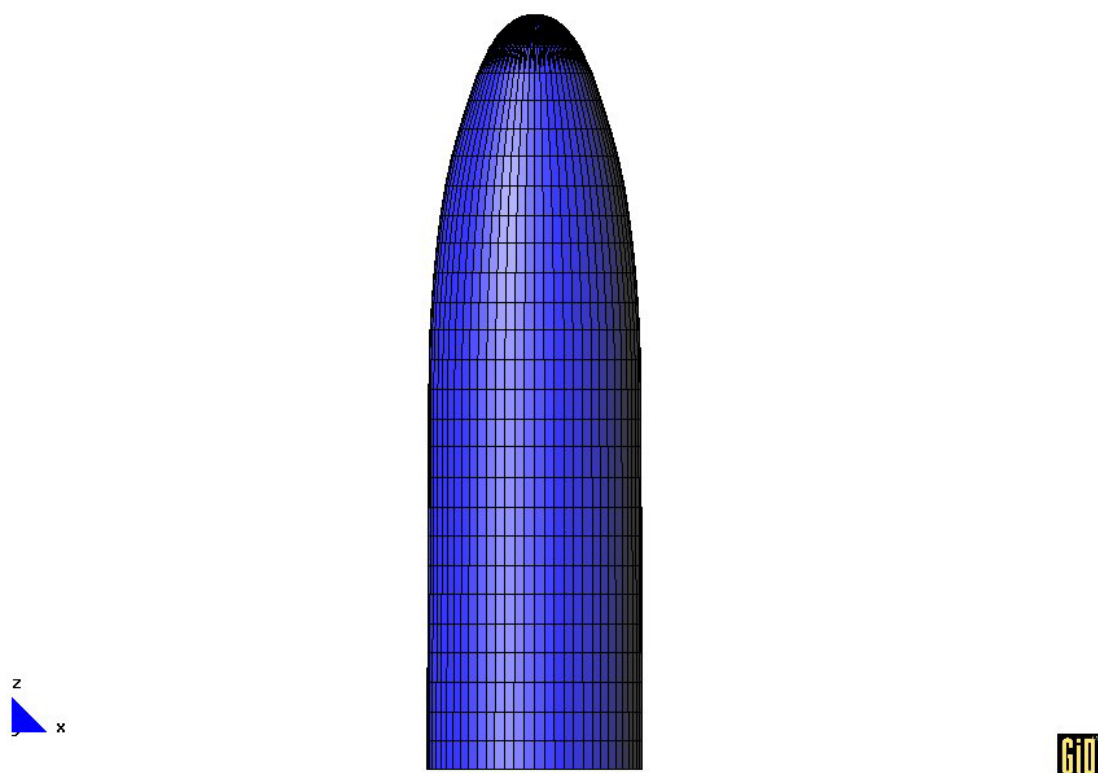


Figura 5.5: Vista eixos X-Z, flat lighting.

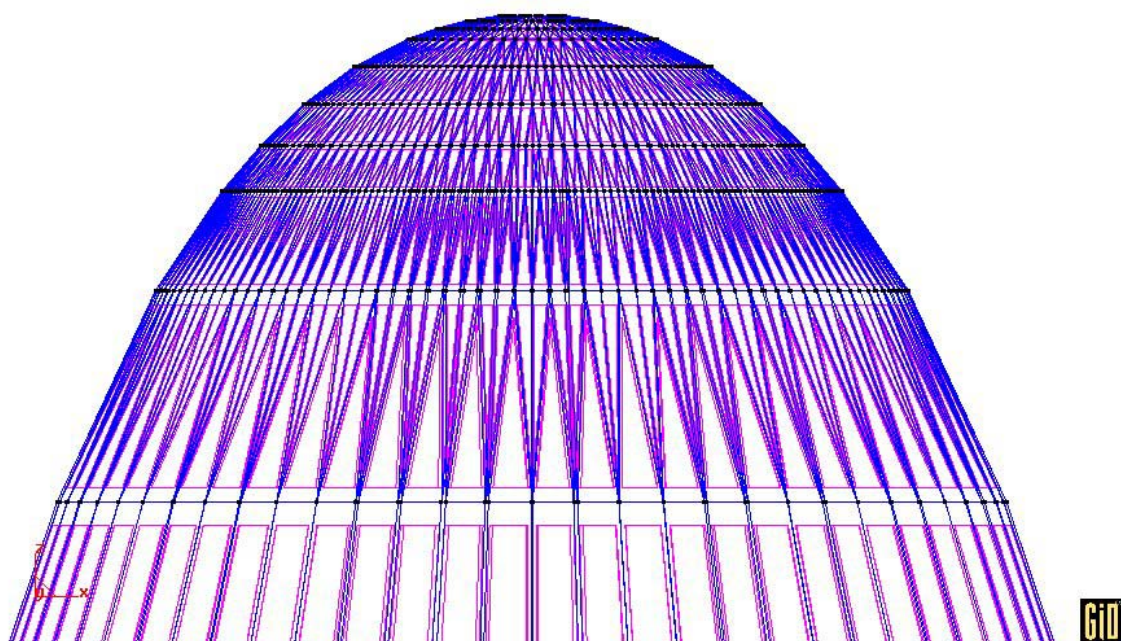


Figura 5.6: Vista eixos X-Z, cúpula on es poden observar més de 1200 superfícies.



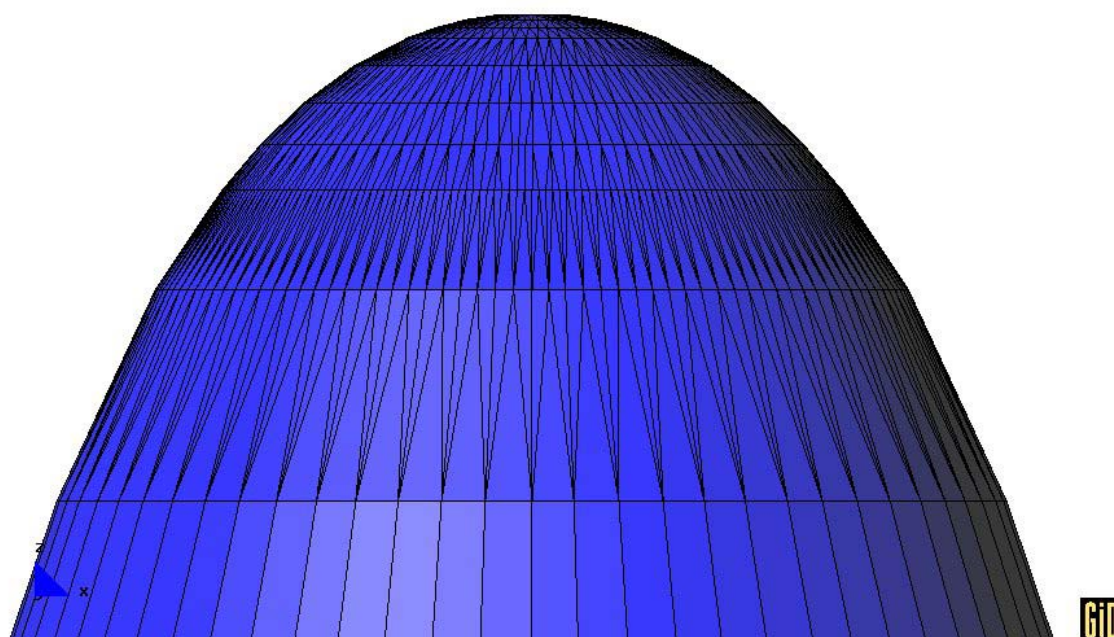


Figura 5.7: Vista eixos X-Z, cúpula Flat lighting.

En els eixos X-Z es pot apreciar millor la gran quantitat de superfícies existents en aquesta geometria i la dificultat que representa treballar-les. Però el millor és, observar la *Torre* en 3D tal com mostren les següents figures.



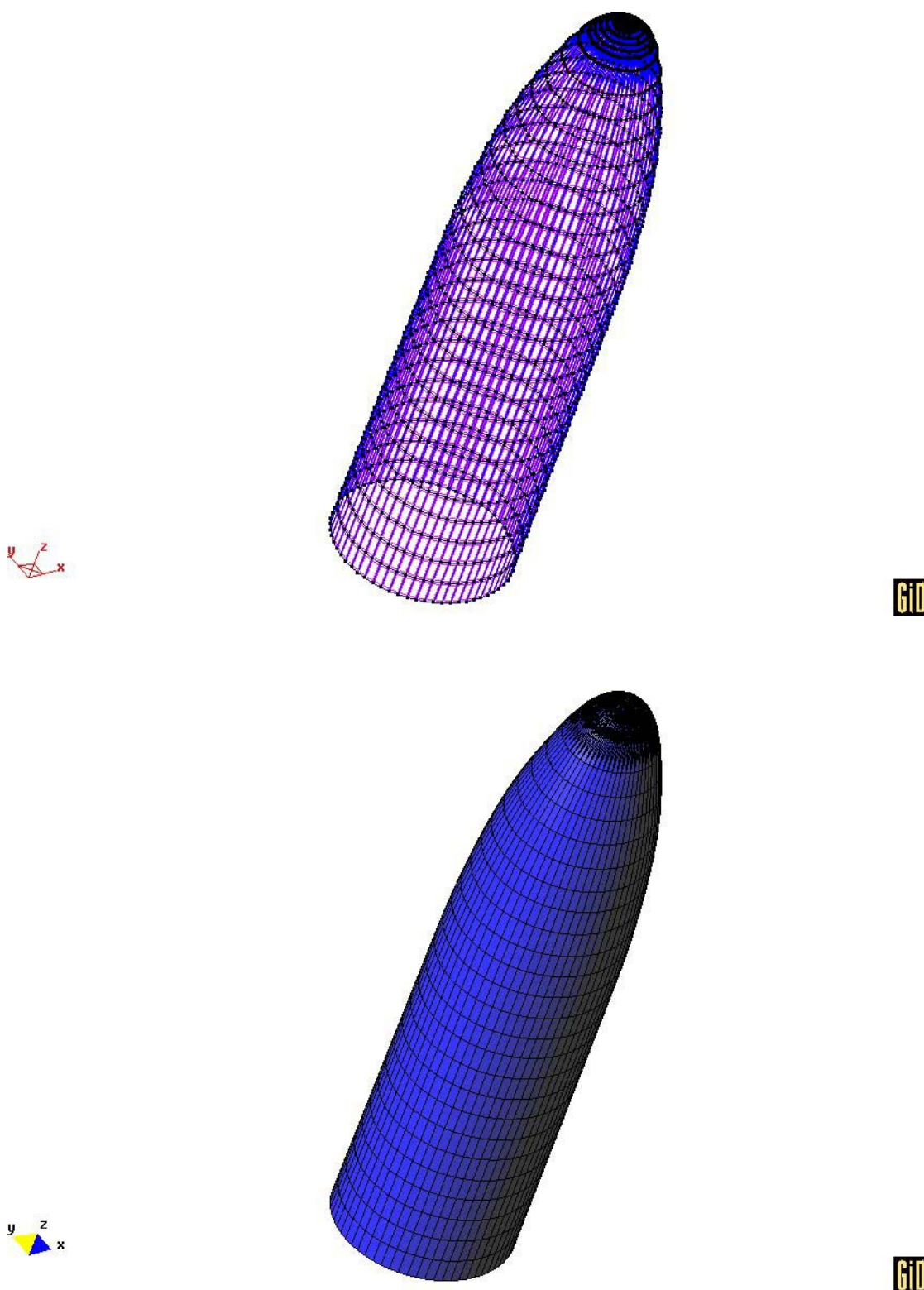
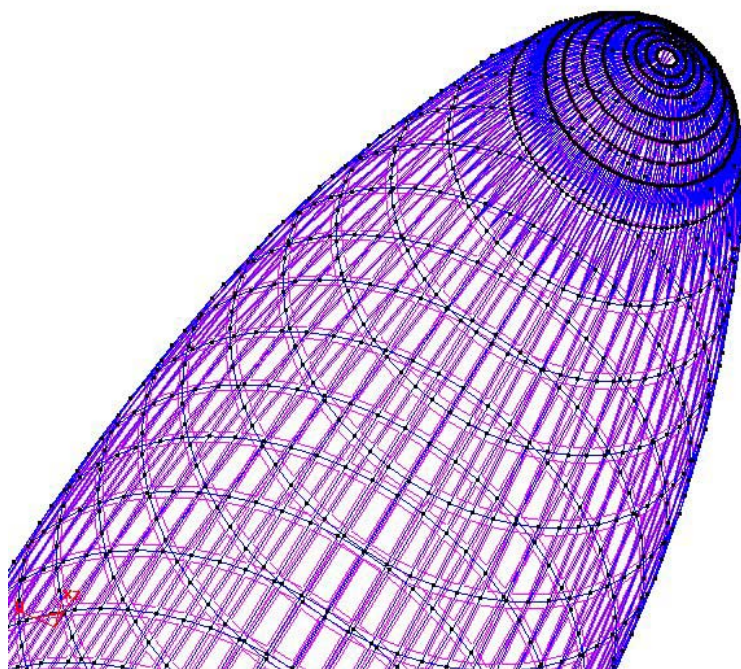
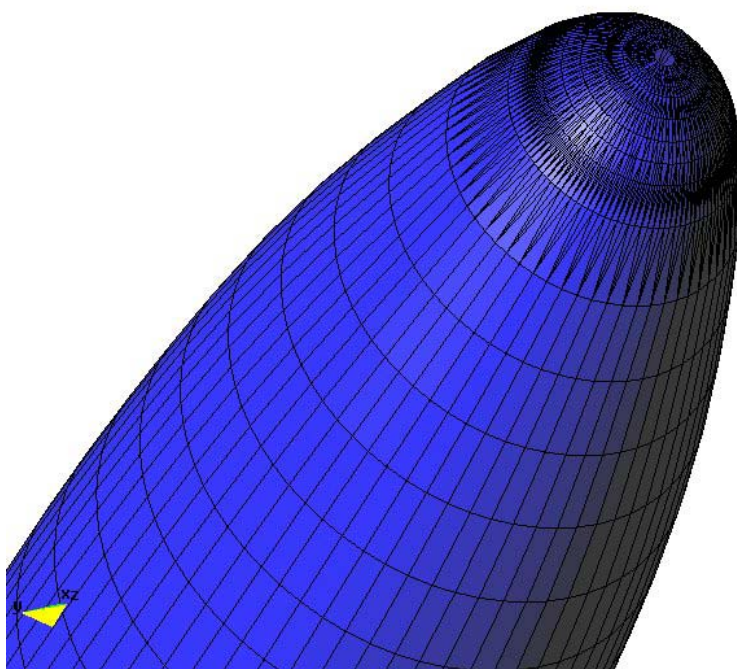


Figura 5.8: Vistes eixos X-Y-Z, 3D.





GiD



GiD

Figura 5.9: Vistes eixos X-Y-Z, 3D. Cúpula



Gràcies a la capacitat del programa *GiD* per poder modificar, variar y crear superfícies s'ha pogut generar una secció en el pla X-Y de la *Torre*. S'ha de tenir en compte que tot i que la *Torre* medeixi 143 metres d'alçada, la secció en el pla X-Y, té pràcticament la mateixa forma independentment de l'alçada en la que es seccioni, simplement varia el factor d'escala. Aquesta variació d'escala, no afecta als resultats obtinguts a una determinada alçada. Per la simulació que es realitza en 2D, s'ha escollit el perímetre de la secció a alçada 50 metres, per tal de simplificar el treball d'operacions amb superfícies. Els resultats obtinguts a alçada 50 metres, són aplicables a qualsevol cota, doncs la geometria pràcticament és la mateixa independentment de l'alçada, menys a la part més alta de la *Torre*, que té alguna diferència.

A una alçada de 50 metres (més o menys 1/3 de l'alçada total), podem dir que el desprendiment existent per part de la cúpula no afecta. Tampoc afecta el efecte del terra en aquesta alçada. Tal com el Sr. Trillas (director d'aquest projecte) ja ha calculat, a una tercera part de l'alçada d'un edifici, aquest efectes, tant del terra com del desprendiment de la cúpula no afecten. Així doncs , tractant la superfície inicial en 3D, s'aconsegueix una superfície d'estudi en 2D com la següent.

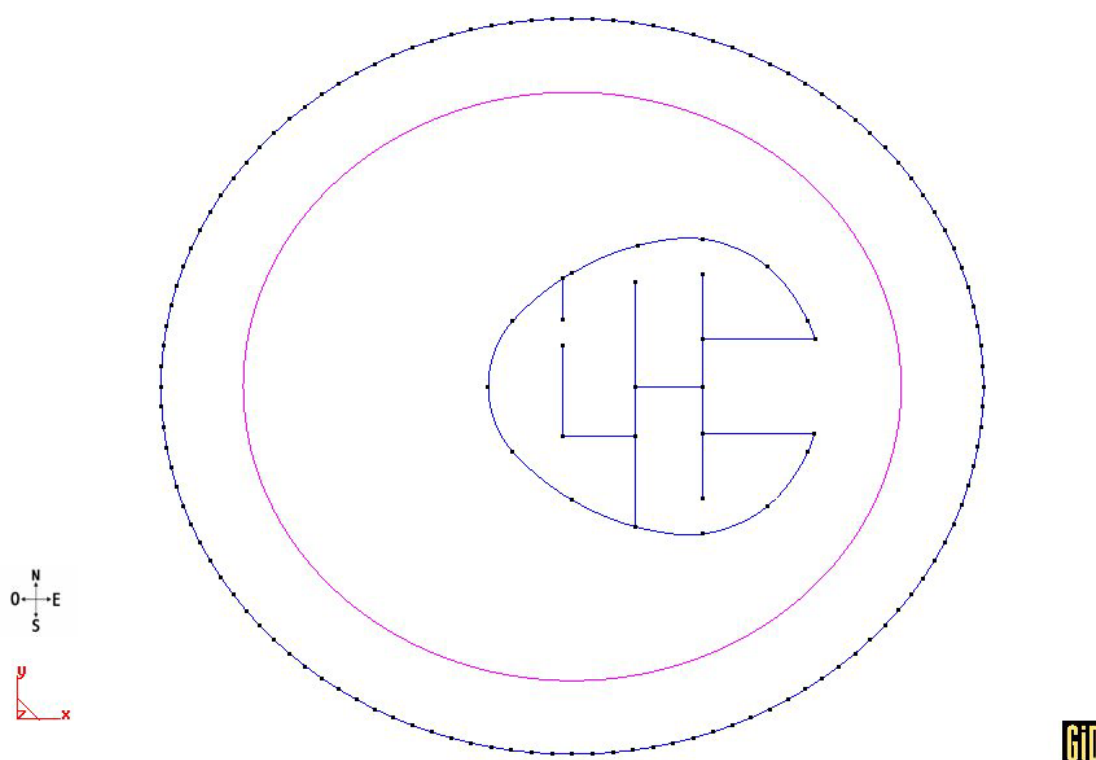


Figura 5.10: Secció en 2D a cota 50 metres (1/3 de l'alçada total). Geometria d'estudi.



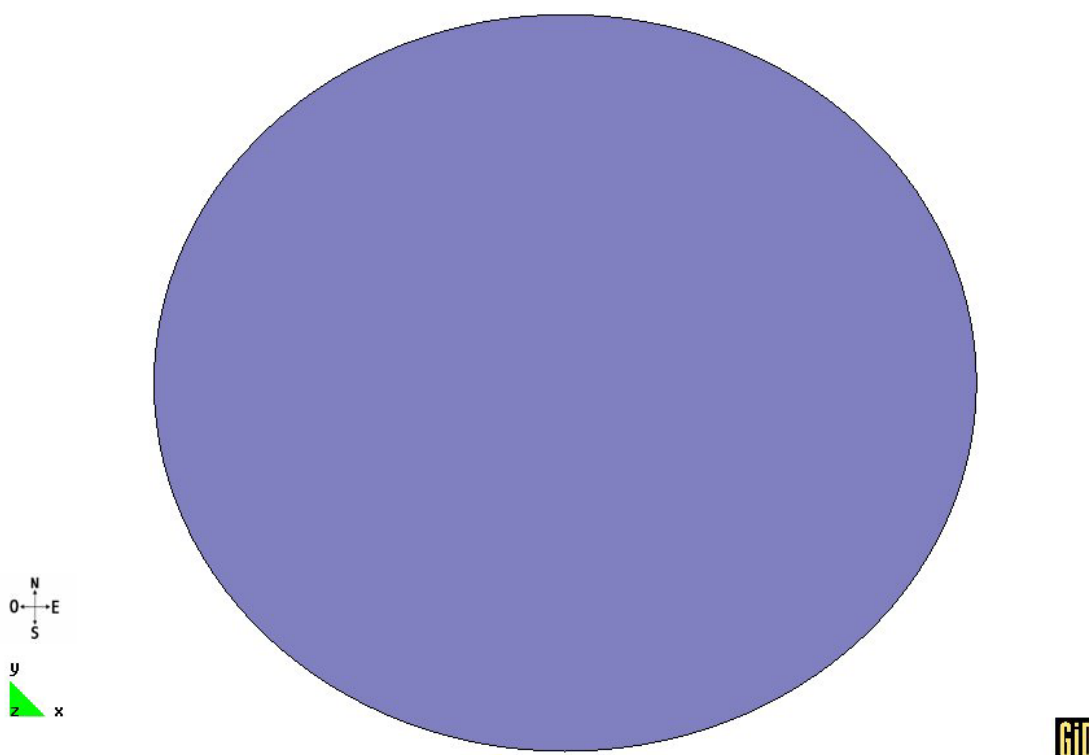


Figura 5.11: Secció en 2D a cota 50 metres (1/3 de l'alçada total). Geometria d'estudi. Flat lighting.

En aquestes darreres *figures 5.10 i 5.11* es pot observar, encara millor, que no es tracta d'una secció circular, sinó d'una superfície oval formada per 120 rectes.

Un cop trobada la superfície se n'ha de crear una altra que l'envolti. Aquesta no pot tenir una geometria qualsevol, sinó que ha de ser de tipus rectangular, ja que a través d'aquesta ha de circular el fluid. Per tal de no falsejar els resultats i tenir prou espai, la superfície que envolta el nostre perímetre d'estudi, ha de tenir unes mides orientatives respecte al perímetre que s'ha d'estudiar. Per aquesta superfície circularà el fluid, així que s'haurà de mallar, la qual cosa significa que ha de ser molt més gran que el perímetre de la *Torre*.



Es busca una forma rectangular per tal de poder definir unes bones condicions de contorn tal com s'explicarà més endavant. Així doncs la superfície, que es mallarà i per on circularà el fluid, queda tal com es veu a la *figura 5.12*.

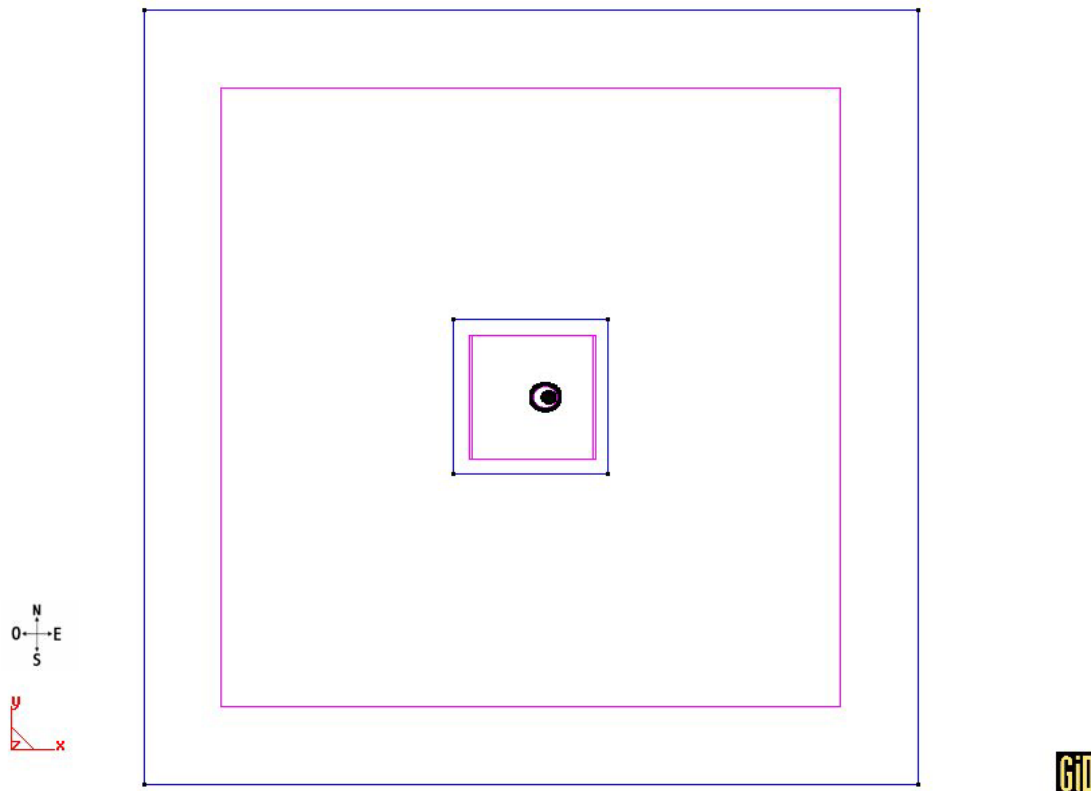


Figura 5.12: Superfícies que envolten a la secció de 2D, per on circularà el fluid.

En la figura anterior es pot observar una part més fosca (la secció de la *Torre*) envoltada per dos superfícies rectangulars. Aquestes dos superfícies s'han creat per tal de poder fer dos mallats de densitat diferent, un mallat més acurat en la petita i un mallat més genèric per a la superfície exterior. Aquest aspecte s'explicarà després.



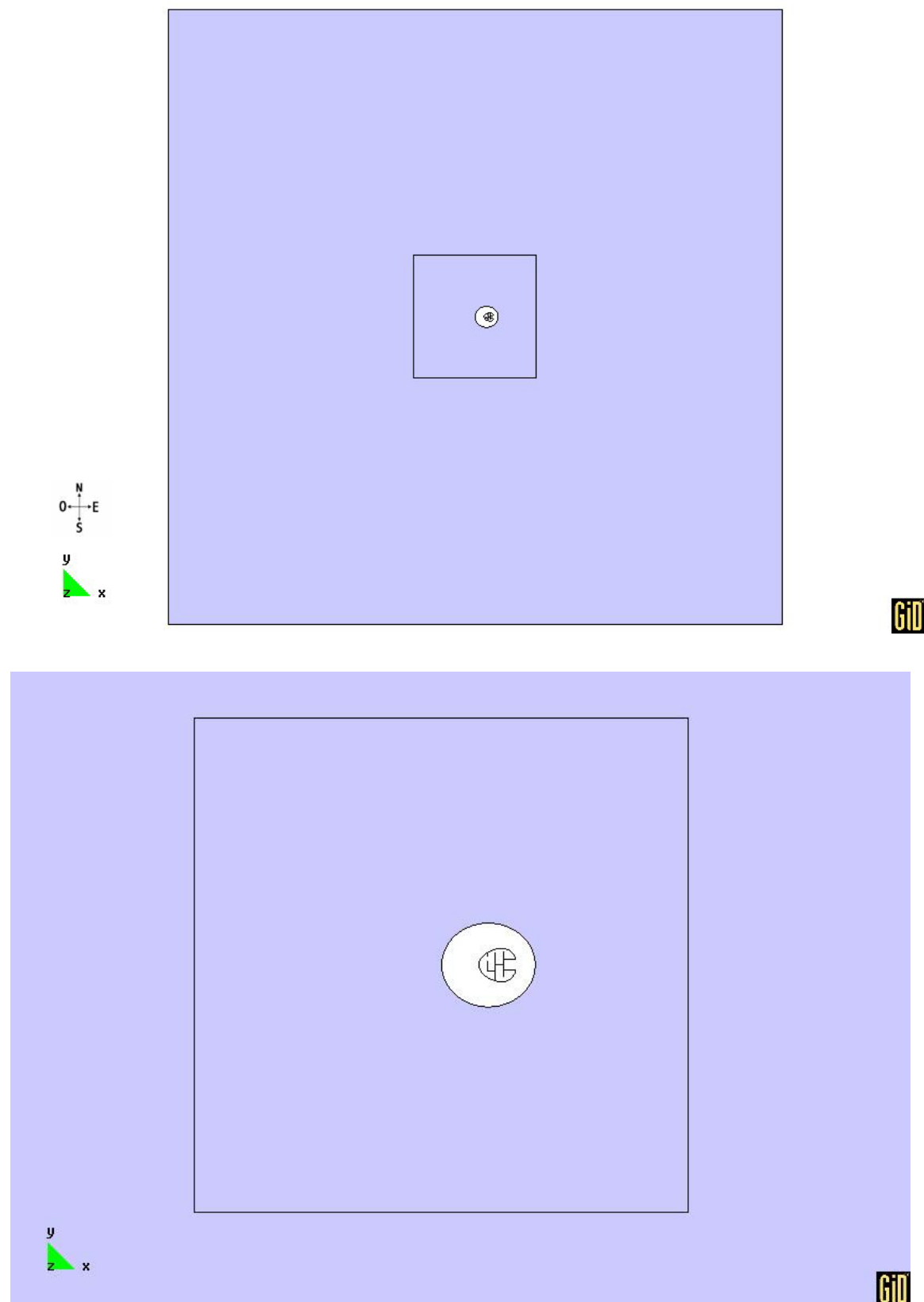


Figura 5.13: Superfícies que envolten la secció de 2D, per on circularà el fluid. Flat lighting.



5.3 CONDICIONS DE CONTORN

El *Tdyn* disposa de múltiples condicions de contorn referents a cada un dels mòduls disponibles. Només s'ha fet referència a les opcions pròpies del *RANSOL*. Dins d'aquestes condicions no s'engloben les propietats de contorn incloses en les propietats del fluid. En entitats geomètriques en 2D, que són les que afecten aquest projecte, són punts i línies. Les condicions de contorn són les següents:

5.3.1 Fixar pressió

Aquesta opció permet assignar pressió a elements. En la majoria de problemes està recomanat fixar la pressió com a mínim en un punt, per tal de determinar un valor de referència. Quan la pressió no sigui especificada en cap punt del domini el programa treballa per defecte amb pressions relatives. En el cas de no conèixer exactament les condicions d'entrada del flux és convenient col·locar l'entrada del flux el més lluny possible de la regió d'estudi.

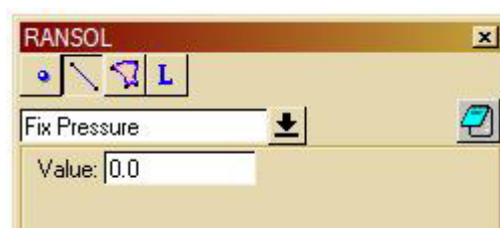


Figura 5.14: Ransol, fixar pressió 0.0.

En aquest cas concret s'ha escollit com a punt de pressió de valor nul, la línia de l'extrem més oposat a l'entrada del fluid, quedant la següent figura. Així el fluid (que anirà en sentit de l'eix de les X), al final del seu recorregut té el valor de pressió nul.



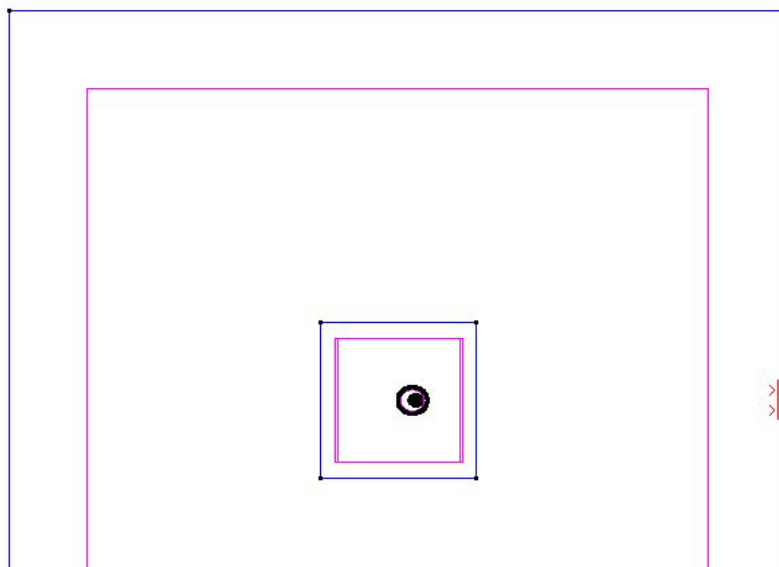


Figura 5.15: Valor de pressió nul.

5.3.2 Fixar velocitat

Aquesta opció permet assignar velocitat a entitats geomètriques, tot definint les components en els eixos V_x i V_y (per a 2D). En aquest cas concret, no s'aplica cap velocitat fixa.

5.3.3 Fixar Vector Velocitat

L'opció permet assignar a entitats geomètriques la direcció del vector velocitat. En aquesta opció s'ha de tenir en compte el sistema de coordenades a utilitzar (global o local). Tampoc s'utilitzarà aquest vector velocitat, ja que necessitem un camp de velocitats.

5.3.4 Fixar camp de pressions



Permet fixar un camp de pressions a una entitat geomètrica. Aquesta opció permet fixar pressions variables en el temps, utilitzant un editor de fórmules convencional. Evidentment les pressions vindran determinades pel vent aplicat sobre el contorn de la *Torre*, així que aquest camp tampoc es té en compte.

5.3.5 Fixar camp de Velocitat

Aquesta opció permet assignar un camp de velocitat especificant els seus mòduls en els eixos. Per al correcte funcionament del domini convé assignar el mateix camp de velocitats a l'entrada que a la sortida del flux. Quan es defineixi el fluid, el mateix programa *Tdyn* s'encarrega de donar els valors necessaris a l'entrada i a la sortida del flux. En les parets perpendiculars al flux s'ha de fixar el camp en la direcció normal al flux.



Figura 5.16: Ransol, camp de velocitats.

Pel domini d'aquest estudi s'han creat una sèrie de camps de velocitats. La línia d'entrada del fluid (l'esquerre), la superior i la inferior tenen camp d'entrada en dos sentits X i Y.



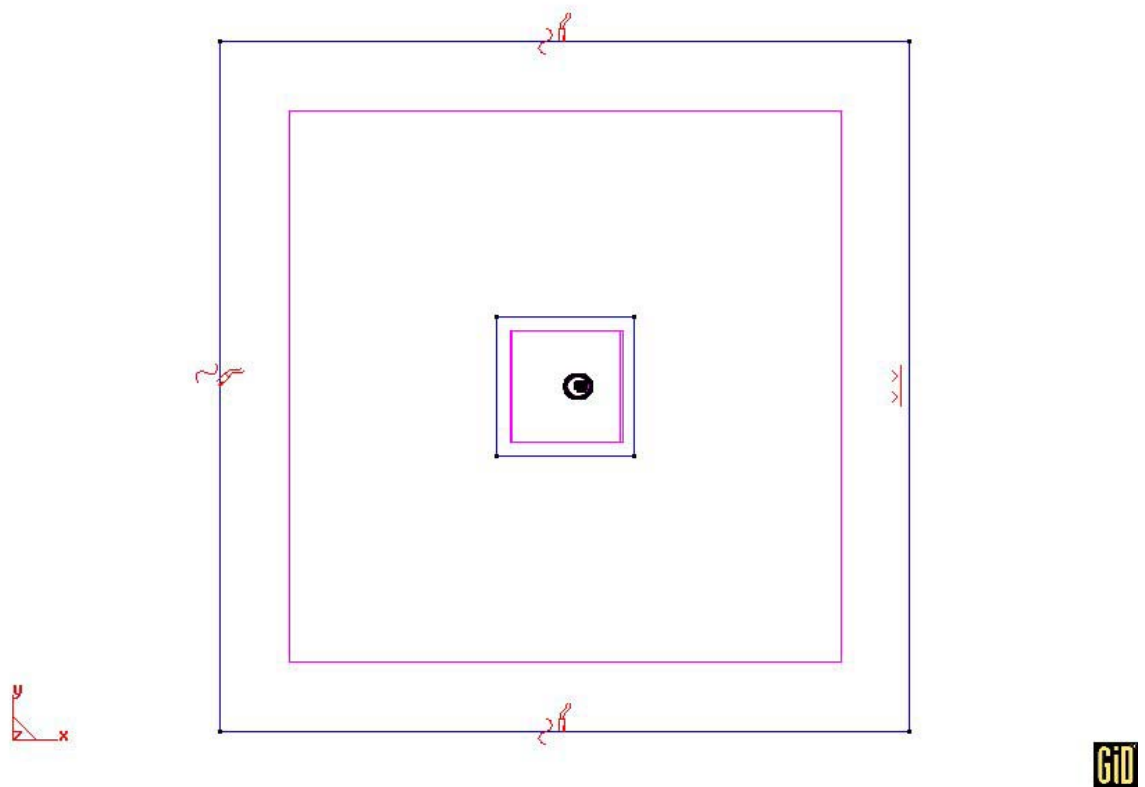


Figura 5.17: Condicions de contorn. Camp de velocitats en sentit X i Y en la línia esquerra. A la superior, només velocitat en el sentit de les X (no hi ha velocitat normal o direcció Y).



5.4 PROPIETATS I CONTORN DEL FLUID

5.4.1 Propietats del fluid

Les propietats físiques de sòlids i fluids estan associades a materials, assignant-se com si fossin condicions de contorn per a determinades zones. Aquests materials es poden descarregar d'una base de dades global o es poden editar i modificar, tot i que en aquest cas, s'han pres les dades existents per defecte.

5.4.1.1 *VelX field*

Si qualsevol condició de *Camp de Velocitat* s'ha assignat a alguna entitat dins d'aquest material, aquest camp s'utilitzarà com a base per a calcular les condicions de contorn. Aquestes opcions permetes són determinar les components de la velocitat.

En l'estudi aerodinàmic que ocupa s'ha escollit un camp de velocitat constant de 28m/s, o sigui de 100 Km/h. aquest valor és l'utilitzat normalment en la zona de Barcelona a totes les construccions. Cal advertir que la velocitat del vent no influirà en trobar el coeficient de resistència a l'aire, perquè al tractar-se d'un valor adimensional no depèn de la velocitat del fluid.

També hi ha l'opció d'escollir una funció enlloc d'un valor fixe, aconseguint així un camp de velocitats variable amb el temps.



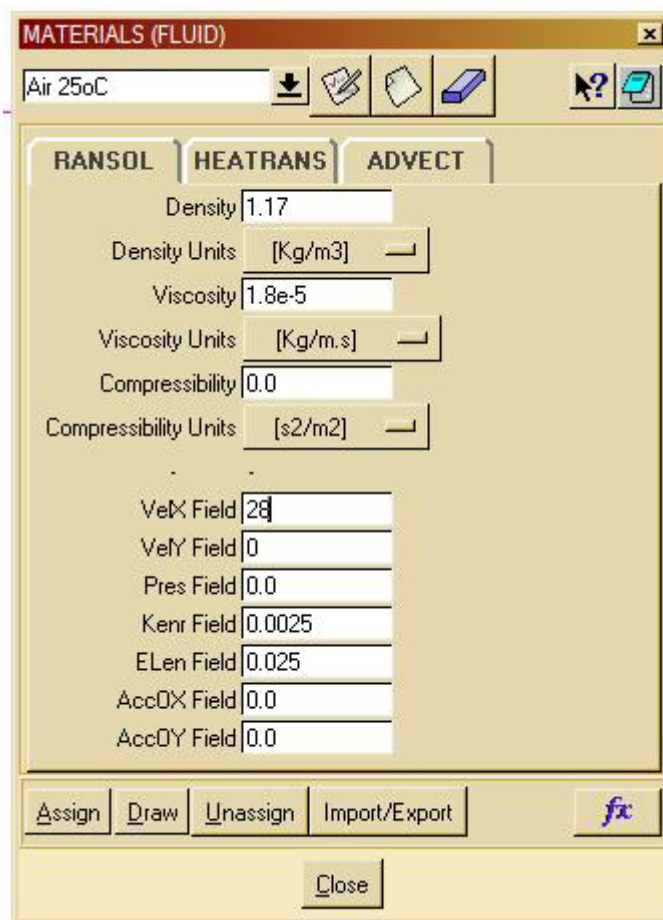


Figura 5.18: Característiques del fluid escollit, per a la simulació.

Com es pot observar en la *figura 5.18*, s'ha escollit com a fluid d'estudi, aire a 25°C, amb les característiques que venen definides per defecte. S'ha assignat una superfície per a que passi el fluid. Com ja s'ha avançat prèviament, el fluid ha de passar per les dues superfícies que envolten la secció d'estudi; *figura 5.19*:



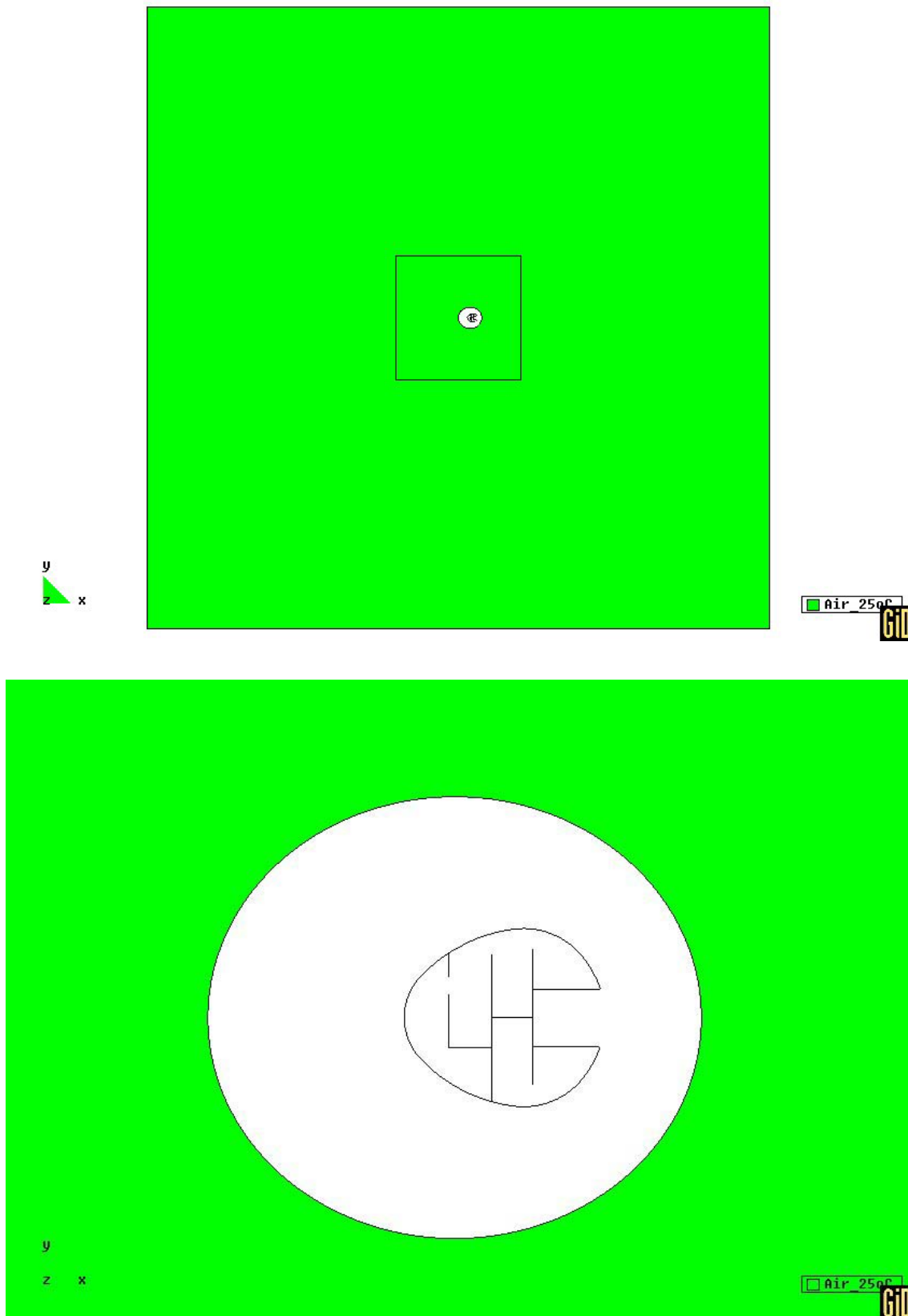


Figura 5.19: La part verda mostra per on passa el fluid (aire a 25°C).



5.4.1.2 Press Field

Pressió inicial i de referència al camp de pressió dinàmic. Pot ser constant o una funció. Si es posa a 0 treballarem amb pressions relatives.

5.4.1.3 Kenr filed

Paràmetre de camp inicial del “Eddy Kinetic” (energia cinètica de la component fluctuant de la velocitat).

$$K = TIL \cdot V^2 \quad (\text{Eq 5.1})$$

K: “Eddy Kinetic” [m²/s²]

TIL: Nivell de Turbulència

V: Velocitat de treball [m/s]

Per calcular aquest paràmetre és a partir de la Intensitat de la Turbulència (TIL: *Turbulence Intensity Level*). La intensitat de turbulència TIL es medeix mitjançant la relació entre la fluctuació de la velocitat i la velocitat mitja del fluid u_{med} .

Com a primera aproximació es pot assumir que la intensitat de turbulència de 1.1% o inferior és baixa, ara bé intensitats superiors al 10% es consideren altes. Una bona estimació de la intensitat de turbulència s'aconsegueix a partir de mesures externes realitzades.



Per al cas de fluxos intensos, la intensitat de turbulència depèn de l'historial del flux aigües amunt. S'ha d'esperar una intensitat de turbulència baixa si el fluid aigües amunt està totalment desenvolupat o no està pertorbat. En cas contrari, si tenim un fluid pertorbat o molt desenvolupat la intensitat de turbulència aigües amunt augmenta en unes quantes unitats (4-5).

La intensitat de turbulència en el centre del fluid totalment desenvolupat en l'interior d'una conducció es pot estimar a partir de la següent expressió derivada de correlacions empíriques de fluxos en canonades.

$$TIL \equiv \frac{u'}{u_{med}} \cong 0.16 \cdot (Re_{D_H})^{-\frac{1}{8}} \quad (\text{Eq 5.2})$$

En fluxos externs de perfils aerodinàmics, el nivell de turbulència típic és $TIL=0.003$ (0.3%). En fenòmens d'estudi de la capa límit es pot arribar a assolir nivells del 30% ($TIL=0.3$) i en fenòmens dins de canonades l'ordre de magnitud acostuma a ser del 5% - 10% (TIL entre 0,05 i 0,1). Recordar que per a la secció d'estudi s'ha emprat el valor per defecte.

5.4.1.4 Elen field

Fa referència a l'escala de longitud turbulenta (L). Per tal d'estimar aquesta escala es necessita conèixer l'escala de dissipació de la turbulència (ε) mitjançant la següent relació:

$$L = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{\kappa^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (\text{Eq 5.3})$$



On C_μ és una constant empírica especificada en el model de turbulència que es pot aproximar a 0.09. La dissipació de turbulència ε es pot determinar a partir de la relació de viscositat $\frac{\mu}{\mu_t}$ i k utilitzant la següent relació:

$$\varepsilon = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\mu} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)^{-1} \quad (\text{Eq 5.4})$$

Per obtenir bones solucions s'acostumen a prendre $\frac{\mu}{\mu_t}$ valors entre 1 i 10. En fluxos interns en canonades s'acostuma a utilitzar d'un 1% a un 10% del diàmetre hidràulic.

5.4.2 Contorn del fluid: *Fluid Body*

Es defineix com a contorn del fluid aquell que és objecte de l'estudi i en el post-procés és el punt de referència de les forces de contorn. El contorn propi del *RANSOL* que és *Fluid Body*. És important definir correctament el contorn del fluid i assegurar-se que geomètricament no hi hagin problemes de definició, com per exemple forats, ja que en el post-procés s'ha d'utilitzar per calcular les forces de pressió en tot el contorn, tal com s'explicarà més endavant.



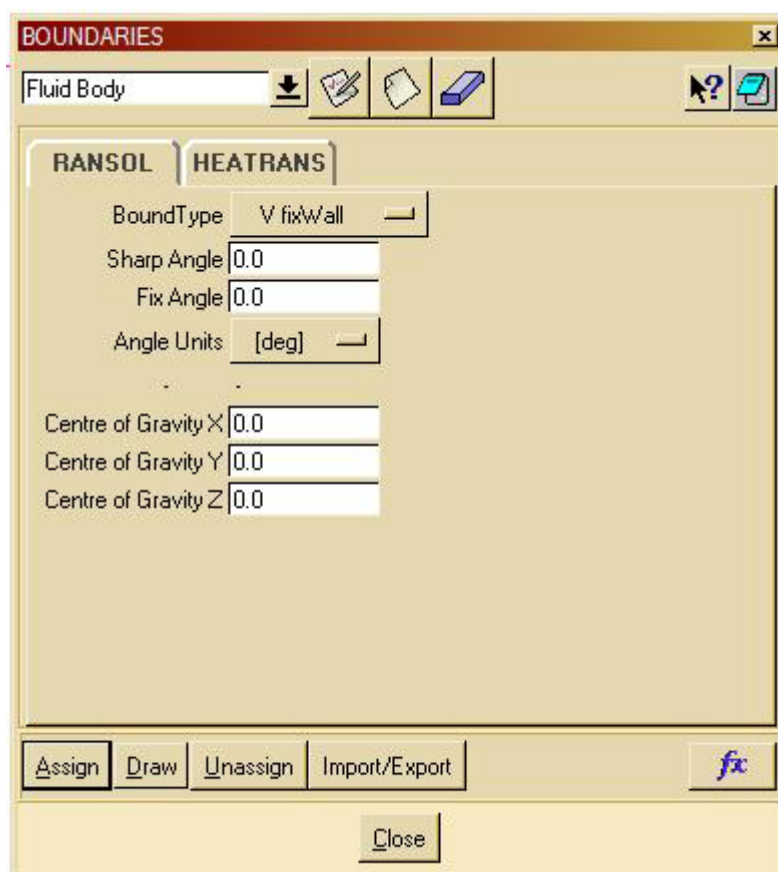


Figura 5.20: Boundaries, contorn del fluid.

Dins la geometria d'estudi s'ha definit com a *fluid body* tot el perímetre de la secció de la *Torre Agbar*, serà en aquesta secció on s'haurà d'estudiar la distribució de pressions. Mostra d'aquest contorn és la *Figura 5.21*.



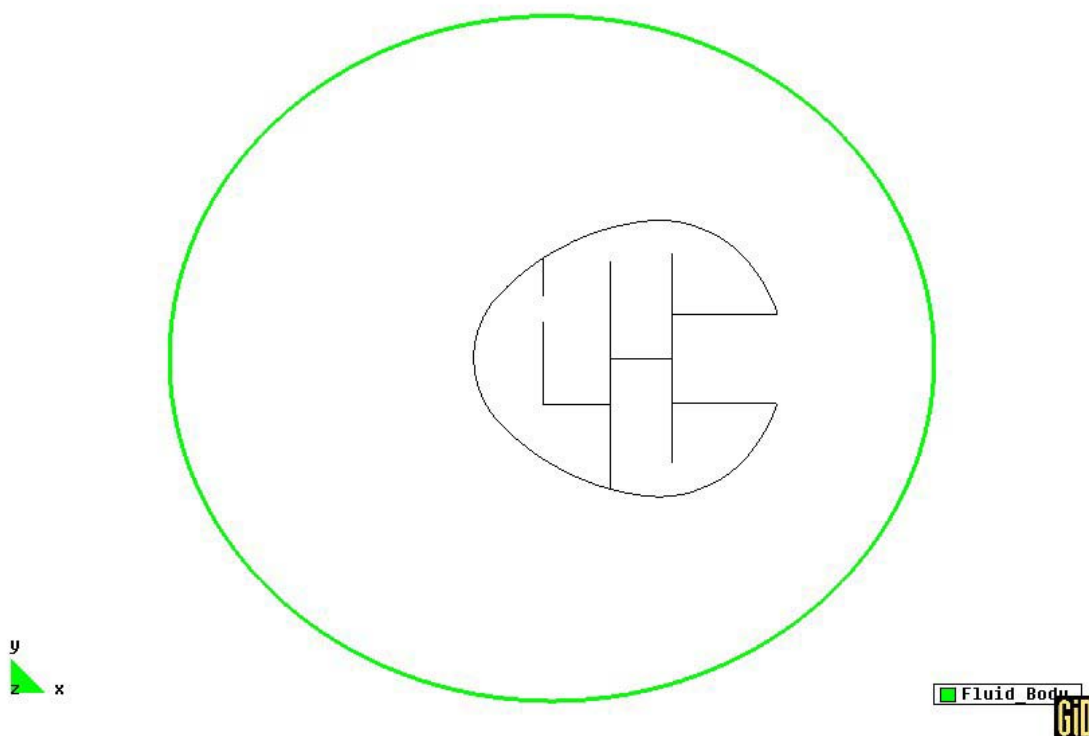


Figura 5.21: Fluid Body

El contorn de color verd de la *Figura 5.21*, serà el que en el post-procés es necessitarà per integrar tota la distribució de pressions.

5.4.2.1 Opció *BoundType*

Permet escollir el tipus de límit de la paret:

- InvisWall: Vector normal a la velocitat és zero.
- V_fixWall: Imposa la condició de la velocitat nul·la en el límit del contorn del fluid, és a dir, en la paret. Aquesta és l'opció escollida en el nostre cas.



- None_Wall: Cap condició serà aplicada al contorn.
- RoughWall: La llei de la condició de la paret, tenint en compte la rugositat de la paret, és aplicada a la distància de la paret δ . La tensió fluida (la tracció) donada per la llei de la paret a una distància δ s'aplicarà com a condició en el solver fluid.

Existeixen molts més tipus de condicions de contorn però no es comentaran, només s'ha fet referència a les més comunes en aquest tipus de simulacions.

5.5 DEFINICIÓ DEL PROBLEMA



Un cop definit el contorn del fluid i les condicions de contorn, es pot passar a determinar les opcions de definició del problema. Aquestes opcions són: els models de turbulència i l'elecció de les normes de convergència.

El programa de simulació *Tdyn* cobreix una gran quantitat i varietat de problemes. És per aquest motiu que es realitzarà un estudi del seu funcionament a nivell d'usuari del programa. Cal esmentar que per a la realització del projecte ha estat necessària una tasca d'estudi important per arribar a aquests coneixements.

A continuació es presenta una petita introducció dels fonaments teòrics del programa.

Per a tot tipus de fluid el programa utilitza les equacions de conservació de la quantitat de moviment i la massa.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (\text{Eq 5.5})$$

On p és la pressió estàtica, τ_{ij} és el tensor de tensions, pg són les forces gravitacionals i F_i les forces exteriors.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (\text{Eq 5.6})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (\text{Eq 5.7})$$



L'expressió anterior és l'expressió general de l'equació de continuïtat on el terme S_m , representa la massa afegida a la fase continua des d'una segona fase dispersada o des d'una altra font definida per l'usuari.

En funció de l'especificació i de les característiques del problema, el *Tdyn* utilitza i resol unes altres equacions addicionals. Per exemple:

- S'afegeix un tipus d'equació de conservació per a fluxos amb barreja de substàncies on intervenen reaccions.
- Equacions addicionals de transport s'han de resoldre per al cas de flux turbulent.
- Es resol una equació addicional de conservació de l'energia per a fluxos que inclouen transferència de calor i compressibilitat.



5.6 MODELS DE TURBULÈNCIA

No hi ha cap model de turbulència universalment acceptat com a òptim per a resoldre qualsevol tipus de problema. Partint d'aquesta afirmació, l'elecció del model de turbulència dependrà de les consideracions que es realitzi i de les condicions físiques del fluid. Altres factors importants seran la pràctica que s'adquireix en la resolució d'un problema, la capacitat de càlcul computacional i el temps disponible per a realitzar la simulació. Per tal de realitzar l'elecció més adequada del model de turbulència per a una determinada aplicació es necessita conèixer cada una de les opcions que ens ofereix el programa. A continuació es descriuran les característiques, avantatges i inconvenients que ofereixen aquests models de turbulència. Els models a estudiar són els següents:

- Laminar
- Mixing_Length
- Smagorinsky
- Models d'una equació cinètica "k"
- Models de dues equacions k- ϵ
- Models de Reynolds Share-Stress-Model (SST)

5.6.1 Laminar

Model clàssic de flux laminar. Les equacions de *Navier-Stokes* es resolen directament, és a dir, el tensor tensió és omès i per tant, només es realitza una simulació directa, sense turbulència.

5.6.2 Mixing_Length



El model de la turbulència bàsic. Model on l'escala de longitud de turbulència (L) és fixada pel fluid, tal i com s'ha comentat anteriorment en les propietats del fluid i en el contorn del fluid.

5.6.3 Smagoriynsk

Model de resolució mitjançant el model de "*Large Eddy Simulation*" (LES). En aquest model els remolins es calculen amb simulacions dependents del temps a partir d'unes equacions que filtren aquells remolins més petits. La filtració és, essencialment, manipular l'equació exacta de Navier-Stokes i esborrar només els remolins més petits que una mesura prefixada, normalment la que defineix la malla. L'atracció de LES permet reduir l'error induït pel model de turbulència.

Les aplicacions més comuns fan referència a geometries simples, degut a l'elevat cost de càlcul que suposa per resoldre equacions. El model LES té un problema de precisió: si es realitza un mallat incorrecte, el propi model condueix a una pèrdua de precisió molt ràpida, però aquest model només s'utilitza en models de poca complexitat geomètrica. Les aproximacions del LES encara estan en fase d'optimització, amb el que no serà utilitzat en aquest cas concret.

5.6.4 Models de Reynolds Share-Stress-Model (SST)

Aquest model fou dissenyat especialment per a aplicacions aeroespacials relacionades amb fluxos de paret may-bounded i ha donat bons resultats per a capes límits sotmeses a gradients de pressió adversos.

Originàriament fou un model més efectiu per a problemes amb un baix nombre Reynolds, que requereixen una bona resolució de la regió viscosa afectada per la capa límit. Aquests models han estat implementats utilitzant funcions de contorn on la resolució de la malla no és suficientment bona, fet que permet considerar-lo com el millor camí per tal d'obtenir



simulacions adequades amb malles no massa fines, i on el càlcul del flux turbulent no s'espera que sigui gaire crític. A més, els gradients pròxims a les parets de la variable transportada en el model siguin menys sensibles a errors numèrics, quan les malles s'utilitzen a prop de les parets.

Aquests models són relativament moderns, no es sap amb precisió si són aplicables a qualsevol tipus de fluid complex de l'enginyeria. Per exemple: no es pot predir la caiguda dels fluxos turbulents, isotròpics i homogenis. Així mateix els models d'una equació són criticats per la impossibilitat d'adaptar-los ràpidament als canvis d'escala de longitud.

5.6.5. Models de dues equacions k- ϵ : K_E_High_reynolds, K_E_Two_Layers K_E_Lam_Bremhost i K_E_Launder_Sharma

Models de dues equacions anomenats k- ϵ , disposen de dues equacions: una equació cinètica "k" i una equació de dissipació de la turbulència ϵ .

És el més simple dels models complets de turbulència. Són models on la solució de dues equacions de transport separades porta a determinar independentment la velocitat turbulenta i les longituds d'escala.

El model k- ϵ en *Tdyn* s'adapta a aquest tipus de model de turbulència i s'utilitza en els càlculs de flux d'enginyeria des de que el van proposar *Jones i Launder*. És robust, econòmic, de raonable aproximació per un rang molt ampli de fluxos turbulents. És per aquest motiu que té gran popularitat en flux industrial i simulacions de transferència de calor. És un model semiempíric, ja que les equacions resulten de consideracions de fenòmens empírics.

Dins dels models de dues equacions també podem trobar petites diferències:



5.6.5.1 K_E_High_Reynolds

Model amb dues equacions $k-\varepsilon$ per a fluxos turbulents, amb integració del contorn i amb precisió elevada per a turbulències altes. Però amb un rang de fiabilitat restringit si els nombres de Reynolds són menors que $1 \cdot 10^6$, en aquests casos no acostuma a ser utilitzat per la seva falta de precisió.

5.6.5.2 K_E_Two_Layers

Model amb dues equacions $k-\varepsilon$ amb les que implementant com l'anterior per a nombres de Reynolds alts i mitjos, amb un rang més ampli d'aplicació i amb la diferència que amb les seves expressions té a disposició un gran nombre de contorns de fluid disponibles per a la seva implementació.

5.6.5.3 K_E_Lam_Bremhorst

Model amb dues equacions $k-\varepsilon$ amb integració del contorn, implementades amb teoria de *Lam i Bremhorst* amb modificacions per a utilitzar diferents contorns de fluid. Els seus rangs de turbulència són mitjans i baixos.



5.6.5.4 K_E_Launder_Sharma

Model amb dues equacions $k-\varepsilon$ amb integració del contorn, implementades amb teoria *Launder i Sharma*. Disposa de dos tipus de contorn de fluid, adaptats per a un rang de turbulència mig.

5.6.6 Models de Reynolds Share-Stress-Model: k_Ω i Ω _SST

El model anomenat Share-Stress-Model (SST) o Reynolds Stress Model (RSM) és el model de turbulència més elaborat que proporciona el *Tdyn*. Amb la hipòtesis de viscositat isotròpica dels remolins, el SST resol l'equació de *Navier-Stokes* promitjada de Reynolds solucionant equacions per al Reynolds stress, conjuntament amb l'equació per radi de dissipació ε . L' SST té en compte els efectes de corbatura, remolins, rotació i canvis ràpids de fluxos forçats d'una forma més rigurosa que els models d'una o de dues equacions. És la millor forma de donar solucions suficientment aproximades de fluxos complets.

Les prediccions encara estan limitades per les aproximacions realitzades al modelar diversos termes en les equacions de transport exactes per Reynolds stress. L'SST no sempre produeix resultats superiors a models més simples. De totes formes, és imprescindible la seva utilització quan les característiques del flux són el resultat de l'anisotropia. Entre els exemples es poden mencionar els fluxos cíclics, fluxos amb molts remolins en cambres de combustió i el trànsit de flux secundari en conduccions. Existeixen dos tipus d'SST disponibles en el *Tdyn*.



5.6.6.1 K_Omega

Models amb dues equacions $k-\omega$ més 4 models turbulents amb integració del contorn del fluid implementada en la teoria de Wilcox. No estan disponibles tots els models de contorn del fluid. Per aquest motiu resulta inadequat per a superfícies rugoses.

5.6.6.2 K_Omega_SST

Models amb dues equacions en expressió conjugada provinent de les equacions d'energia i de dissipació $k-\varepsilon$ i l'altra del model share-stress anomenades $k-\omega$. Aquest model pot ser utilitzat per a tots els tipus de contorn.

5.6.7 Model escollit per l'estudi aerodinàmic

El model de turbulència escollit per l'estudi aerodinàmic de la *Torre Agbar de Barcelona* ha estat el de *K_E_High Reynolds*, doncs en el cas que ocupa, és interessant tenir un flux turbulent amb el que necessitem nombres de Reynolds elevats. Aquest model només accepta mallats fins i bastant concrets i difícils de fer, però per contra reporta uns resultats molt exactes.

En la prova inicial realitzada amb la lluminària, s'han provat altres models matemàtics com l'SST i el RSM, donant un resultat físicament no possibles o amb uns temps de computació massa elevats; així doncs per al contorn de la *Torre Agbar de Barcelona* s'ha escollit el model: *K_E_High Reynolds*, tal i com es pot veure en la següent figura:



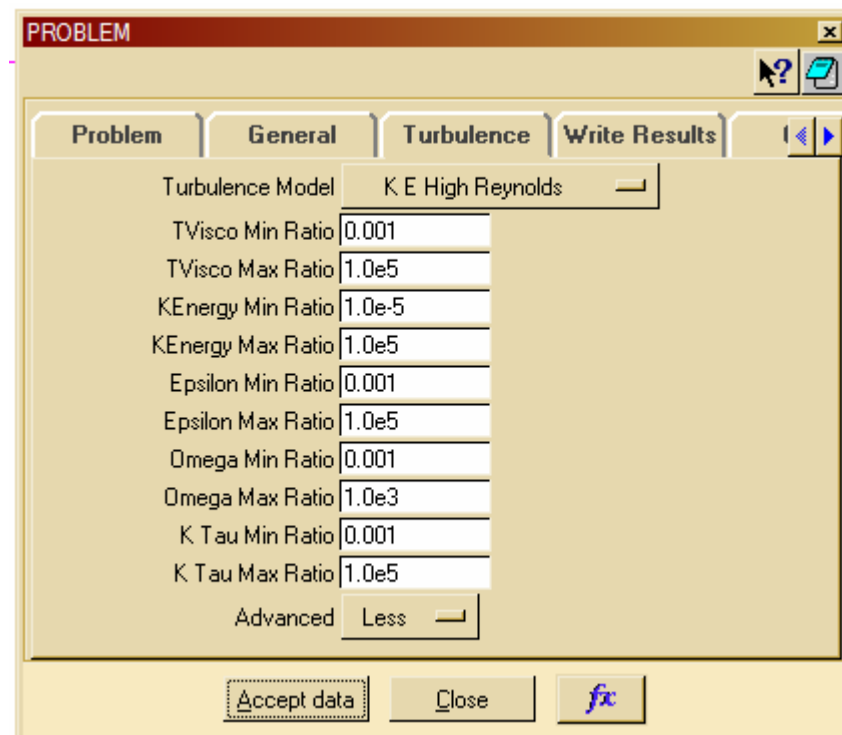


Figura 5.22: Model escollit: K_E_High Reynolds



5.7 OPCIONS GENERALS DEL PROGRAMA *Tdyn*

Entre les opcions del programa *Tdyn* es poden distingir aquelles que faciliten la computació:

5.7.1 La definició de simetries

Cerca de simetries respecte als eixos definits per l'usuari o els eixos absoluts.

5.7.2 Definició de gravetat

La gravetat sobre el fluid es defineix aquí, i no en l'acceleració del fluid.

5.7.3 Opcions de pressió

Possibilitat de treballar amb pressions relatives o absolutes. Per poder treballar amb pressions absolutes és necessari haver definit la pressió en algun punt.

5.7.4 Definició de les unitats

Permet treballar amb unitats del Sistema Internacional o de qualsevol altre sistema.



5.8 GENERACIÓ DE LA MALLA

El pre-processor del *Tdyn*, el *GiD*, permet realitzar el mallat utilitzant cel·les triangulars, quadrades o una combinació de les dues en 2D. En el cas del 3D, les formes passen a ser tetraèdriques, hexaèdriques o una combinació. També permet assignar als elements de la malla el tipus d'element pel qual s'interpol·la. Els tipus d'interpolació són els següents:

5.8.1 Lineal

Interpolació lineal del segment de la malla lineal que genera dos nodes per segment (un a cada extrem del segment). Per a malles en 2D s'assignen 3 nodes a les de forma triangular i quatre a les quadrades. Pel que fa a 3D: quatre nodes per les tetraèdriques i 8 per les hexaèdriques.

5.8.2 Quadràtica

Interpolació quadràtica del segment de la malla que genera tres nodes per segment (un a cada extrem del segment i un altre al punt mig). En 2D es passa a 6 nodes per les malles triangulars i 8 per les quadrades. En 3D es passa a 10 nodes per les tetraèdriques i 20 per les hexaèdriques.



5.8.3 Quadràtica modificada

Només disponible per als elements quadrats en 2D i els hexèdrics en 3D. En 2D s'afegeix un nou node al centre de la figura, passant així a tenir 9 nodes. En 3D s'assigna un node al centre de cada cara quadrada, passant així a tenir un total de 27 nodes.

A més el *Tdyn* accepta malla per a 'nodes penjats', és a dir, nodes en costats o cares que no són vèrtexs de totes les cel·les que toquen aquestes cares. Amb aquest tipus de cel·les es poden realitzar malles híbrides i malles amb límits no conformes.

L'elecció depèn de l'aplicació. Per tal d'escollir el tipus de malla s'han de considerar els següents aspectes:

- Temps disponible: Com més nodes formin la nostra malla més lent serà el procés de càlcul.
- Despesa computacional: Com major sigui el nombre de nodes i elements, major serà la inversió de temps necessària per realitzar la computació.

Per tal de reduir aquests aspectes, temps disponible i la despesa computacional, s'han creat dos superfícies que envolten el perímetre de la *Torre* que s'estudia. Aquestes dues superfícies pretenen fer dos mallats diferents, un més fi a la vora del perímetre a la superfície interior i l'altre menys fi per a la superfície exterior. Quedant així un mallat més optimitzat per tal de que el temps de càlcul estigui reduït al màxim sense tenir una influència negativa en els resultats obtinguts.

També s'ha realitzat un mallat més fi, a través del perímetre sencer de la *Torre Agbar de Barcelona*, buscant precisament una simplificació a l'hora de realitzar el càlcul.



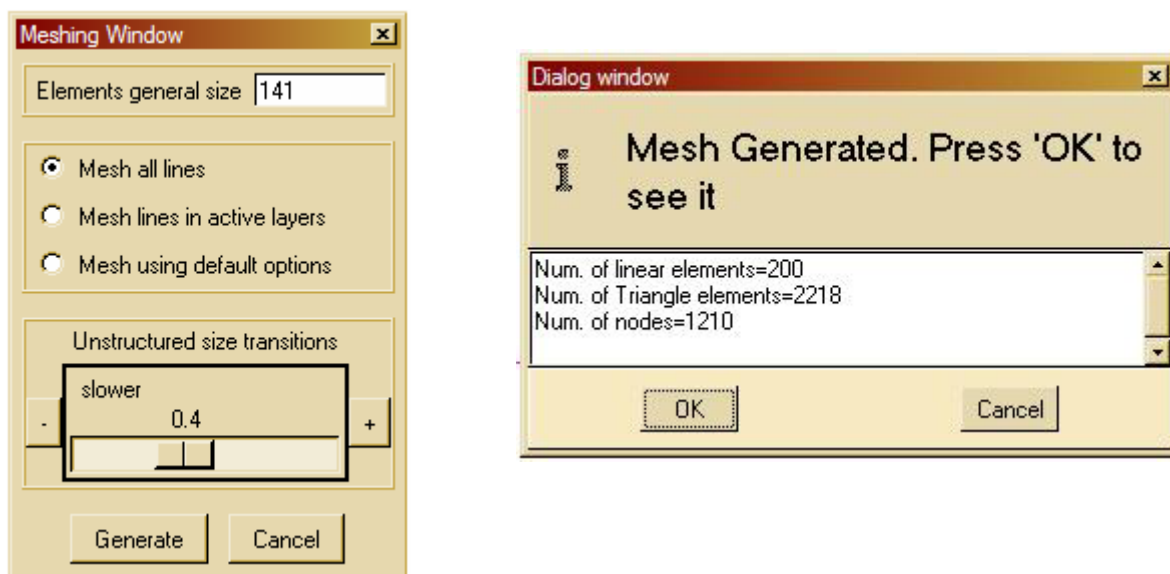


Figura 5.23: Finestres del Tdyn de la generació de malles.

Després de generar el mallat, es pot observar a la figura anterior el nombre d'elements creats:

- Elements lineals: 200
- Elements triangulars: 2218
- Nombre de nodes: 1210



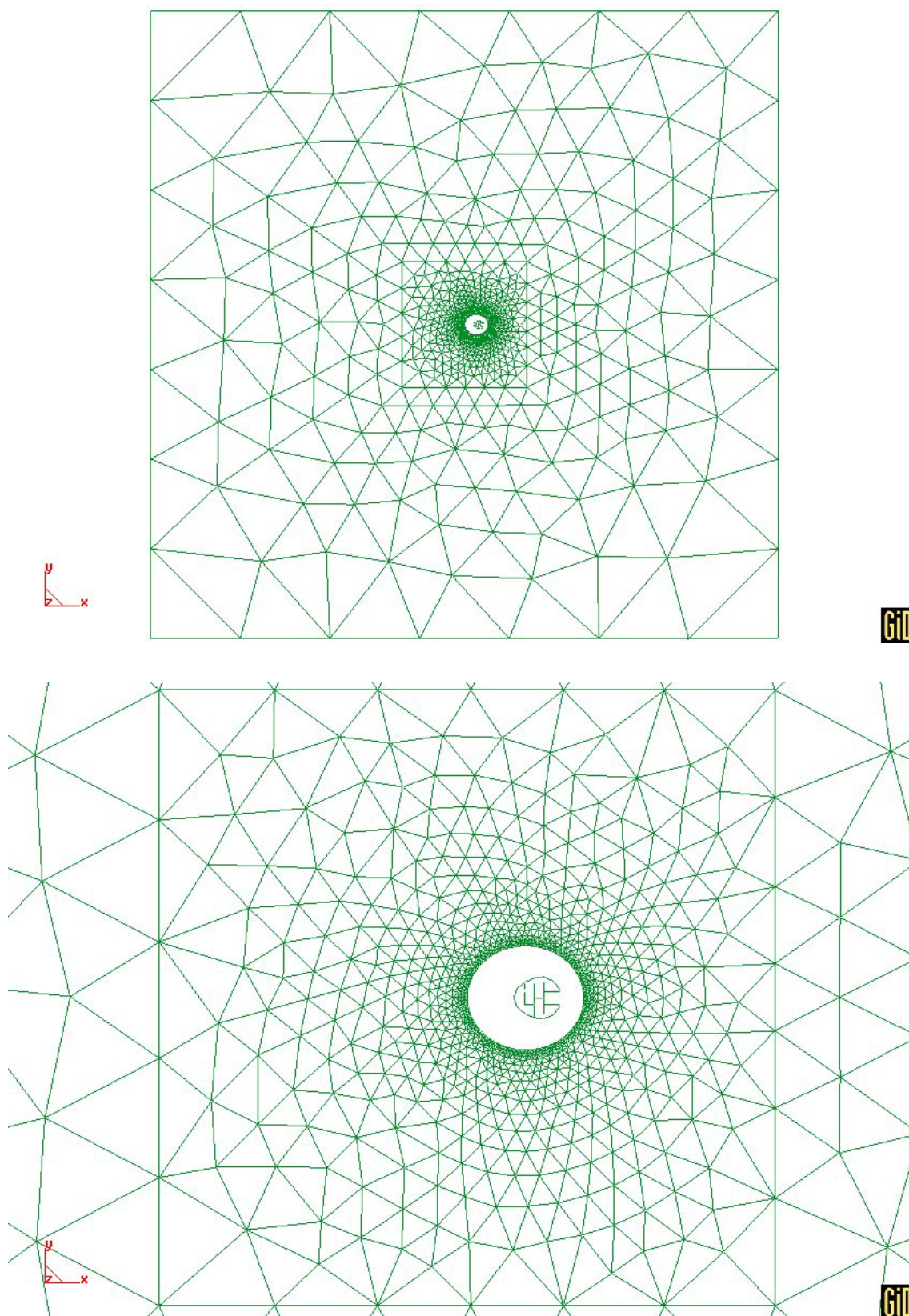


Figura 5.24: Mallats de les dues superfícies.



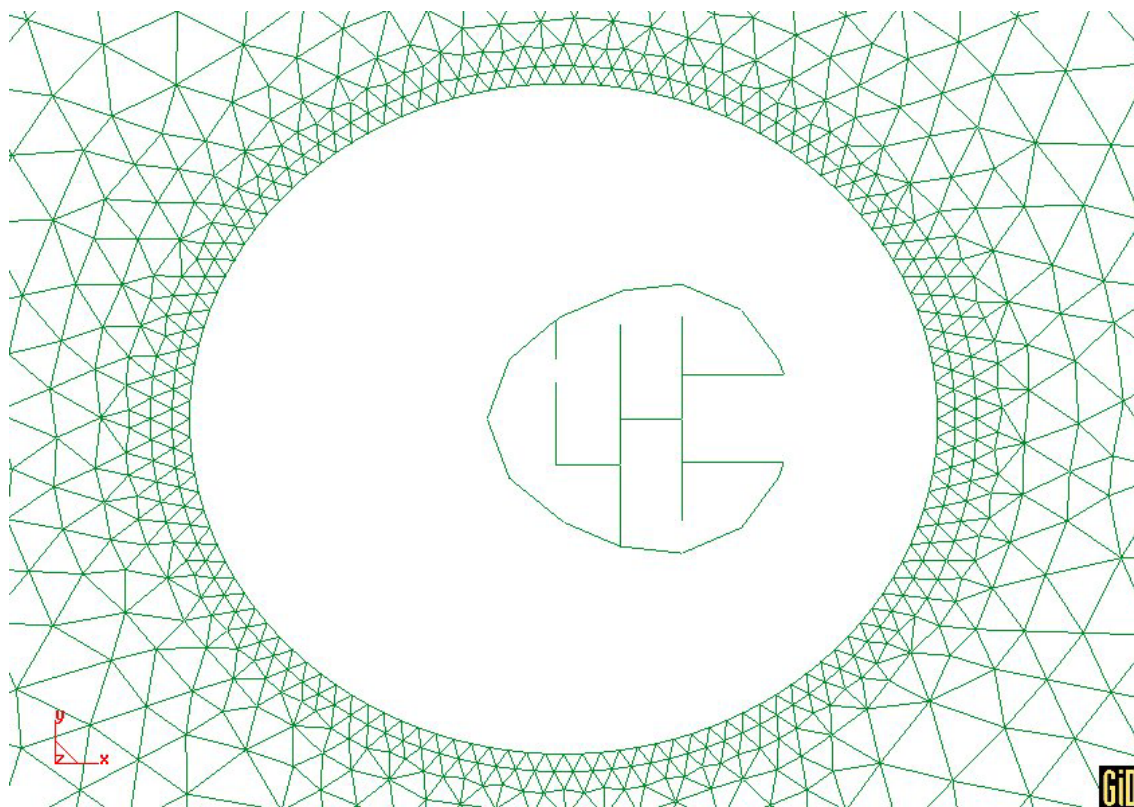


Figura 5.25: Mallat molt més acurat al voltant de la secció d'estudi.



5.9 OPCIONS DEL SOLUCIONADOR SOLVER

El *Tdyn* utilitza dos mètodes numèrics per a la resolució d'equacions de conservació de massa i moment, així com per l'energia i altres paràmetres (la turbulència i les espècies químiques): el mètode segregat i el mètode conjunt.

En els dos es realitza la tècnica dels volums de control discrets de la malla computacional. Acte seguit s'integren les equacions i es linealitzen, obtenint així valors de variables independents.

El *Tdyn* disposa de diferents opcions per al *Solver*. Posseeix unes opcions específiques per a solucionar el fluid, en el mòdul *RANSOL* i una altra opció per a solucionar el sòlid en el mòdul *HEATRANS*. Només s'incidirà en les opcions del mòdul *RANSOL*.

5.9.1 Ftime Integrator

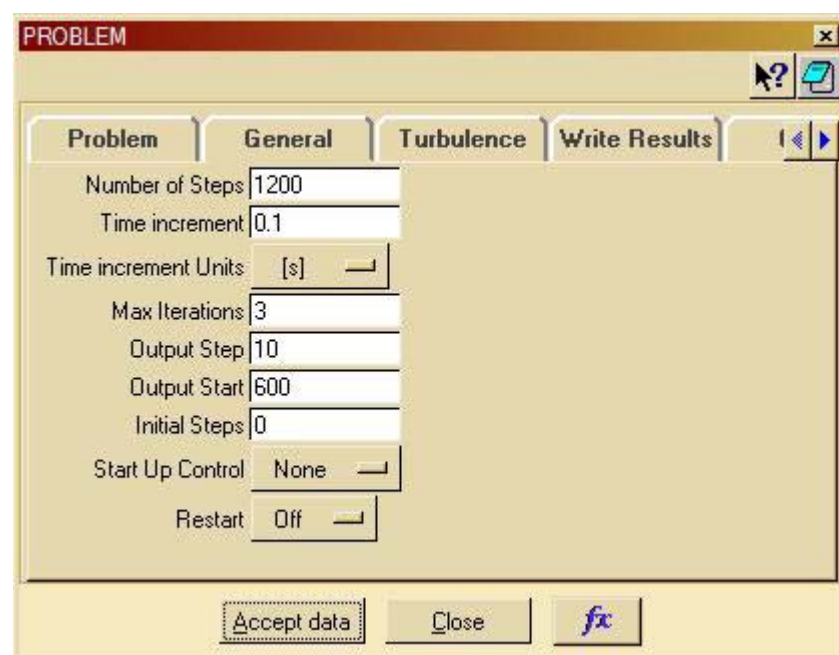
En aquesta opció estan disponibles els mètodes d'integració del *Tdyn*. Aquestes opcions són les de *Backward Euler* (mètode implícit d'integració de primer ordre) i les de *Crank Nicolson* (mètode de segon ordre).

5.9.2 NSI tolerance

Tolerància utilitzada en la solució per al problema simètric. És recomanable escollir valors inferiors a $1 \cdot 10^{-6}$.



Aquestes són les opcions més destacables del mòdul RANSOL i en el cas concret s'ha utilitzat:



5.10 NORMES DE CONVERGÈNCIA

El criteri de convergència utilitzat en les simulacions és l'evolució dels residus com a mesura de magnitud de l'error en la solució de cada iteració.

Després de cada iteració es calcula i s'emmagatzema la suma de residus per a cada variable, amb l'objectiu de tenir un seguiment històric de la convergència i de l'evolució d'aquests paràmetres cap a un valor. Posteriorment el manteniment d'aquest residu és el que condueix a la convergència. La convergència absoluta significa un residu nul, però el programa necessita un valor numèric per tal de tenir una precisió absoluta.

En aquestes normes de convergència s'ha escollit el valor de $1 \cdot 10^{-5}$, que és el que el programa recomana com a òptim.



5.11 ANÀLISI I VISUALITZACIÓ DE RESULTATS

El *Tdyn*, amb la integració del *GiD*, permet realitzar tot tipus de visualitzacions com:

- Iso-línies
- Iso-superfícies
- Contorns
- Vectors velocitat
- Línies de contorn
- Localització de màxims i mínims de pressió i velocitat

Després de realitzar-se el càlcul pertinent, durant un període de temps relativament petit, degut al mallat i a les condicions escollides, es pot dur a terme la visualització de resultats. Evidentment es tracta d'una figura de tipus el·líptica, amb una part més llarga i una més curta, amb el que se li haurà de fer incidir el vent amb diferents inclinacions, per tal d'escollir aquella que sigui més desfavorable en quant a pressions màximes als punts d'estancament. Així doncs, es començarà per la figura mostrada fins ara i es rotarà per recalculer totes les dades i escollir, d'aquesta manera la més desfavorable.



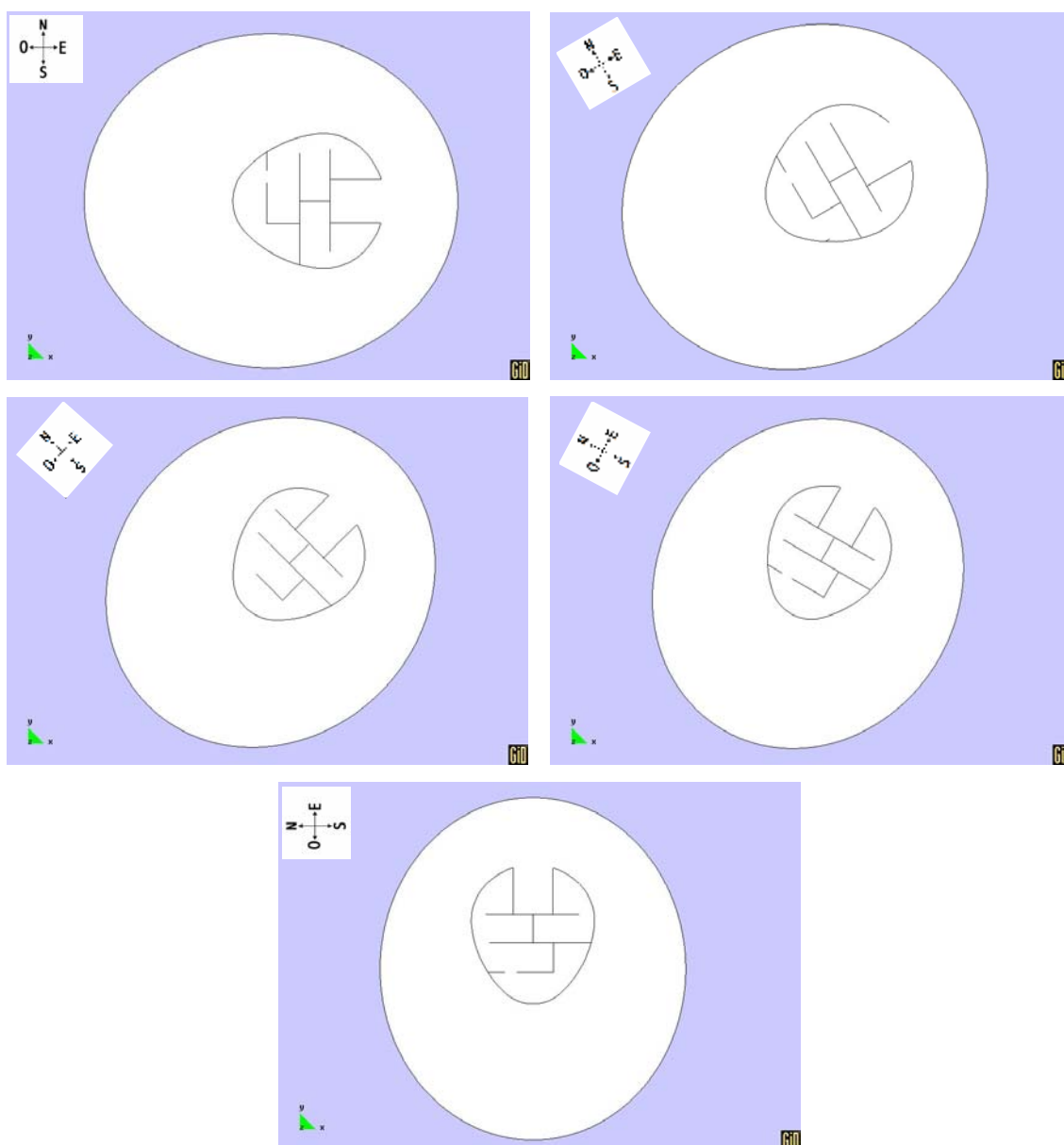


Figura 5.26: Aquestes seran les diferent posicions de la mateixa geometria que s'estudiaran amb un fluid que anirà en sentit de l'eix de les X.



5.11.1 Resultats de la simulació del perímetre inicial: Cas 1

S'ha aplicat un vent a 28m/s que va d'esquerra a dreta en la següent figura.

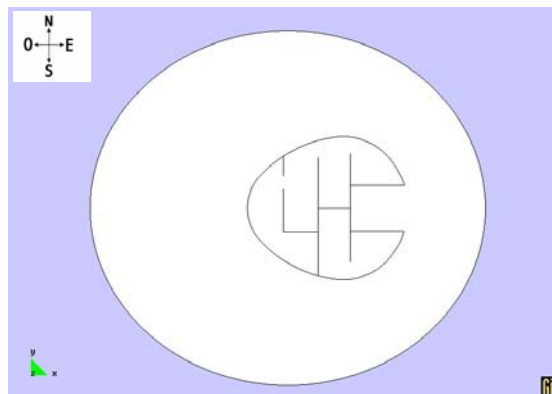


Figura 5.27: Geometria d'estudi per al cas1.

Primer s'ha visualitzat la distribució de pressions:

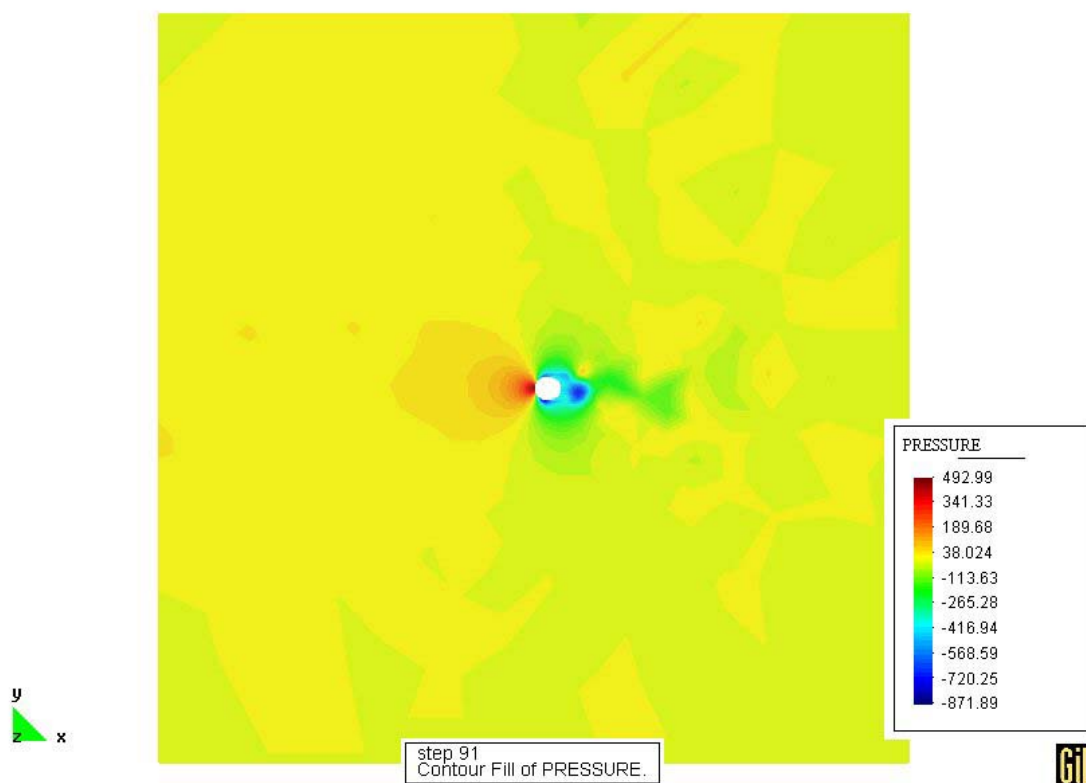


Figura 5.28: Distribució de pressions per al cas1.



Es pot comprobar que la dimensió de les superfícies que envolten el perímetre estudiat, són de tamany suficientment gran per a que no interfereixin les condicions de contorn en els resultats.

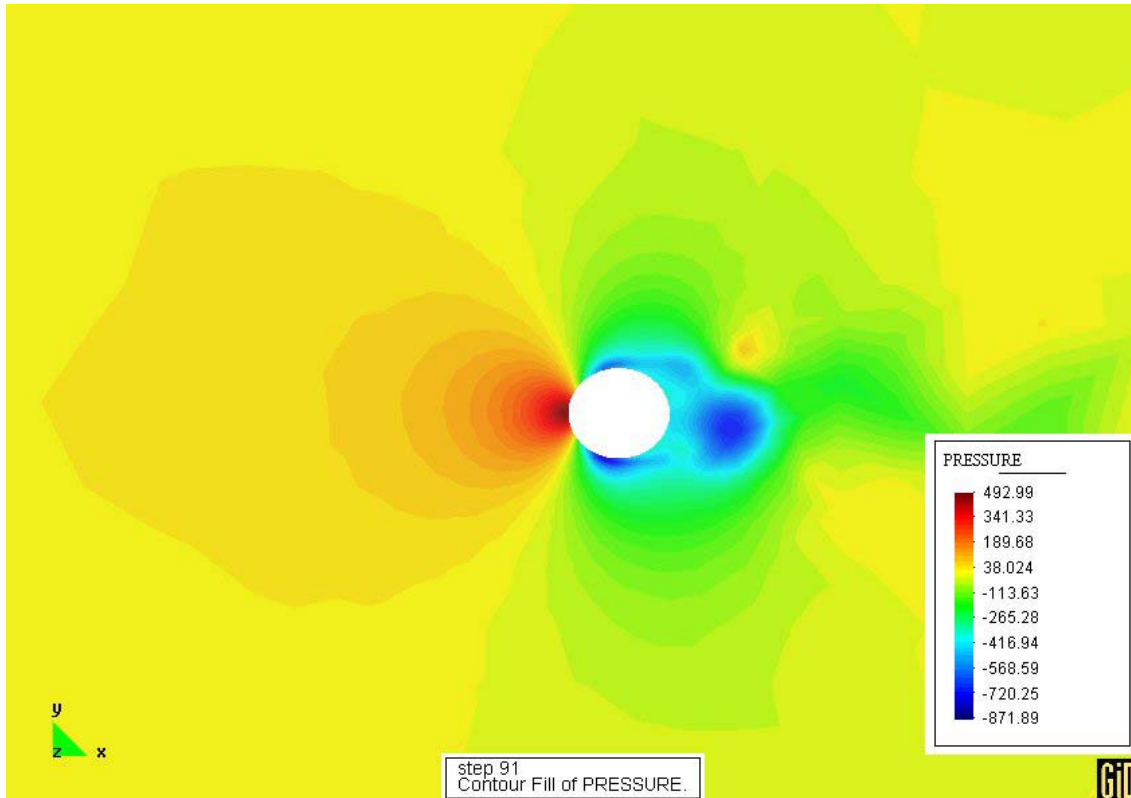


Figura 5.29: Distribució de pressions per al cas1, ampliat.

En la *Figura 5.29* es pot veure clarament com el fluid (aire a 25°), que va d'esquerra a dreta, incideix directament sobre el perímetre d'estudi, creant una pressió a la part davantera, en el punt d'estancament i una depressió en la part posterior. El rang de pressions va des de 492.99 bars fins a -871.89 bars.

A mida que el fluid va circulant, aquestes sobrepressions i depressions van canviant, no es tracta d'una distribució fixa, sinó que varia amb el temps. Es creen una sèrie de vòrtex que van alternant de costat. En aquesta simulació s'ha calculat durant 120 passos (steps). En la següent figura es poden veure els passos 32, 33 i 34, per veure en el temps, aquesta variació de distribució de pressions:



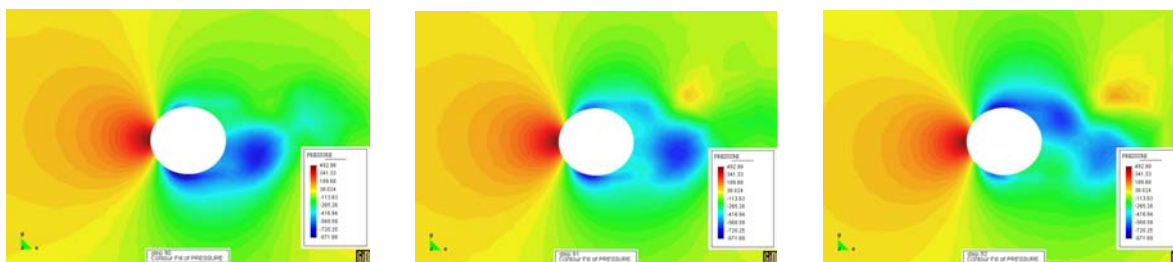


Figura 5.30: Variació de les pressions i depressions en el temps.

Aquesta variació de les pressions i depressions en el temps es podrà aplicar també en els propers altres 4 casos, tot hi que no es torni a comentar.

El Tdyn permet també una visualització de les pressions en forma de línies que delimiten les pressions amb la funció *Contour Lines*:

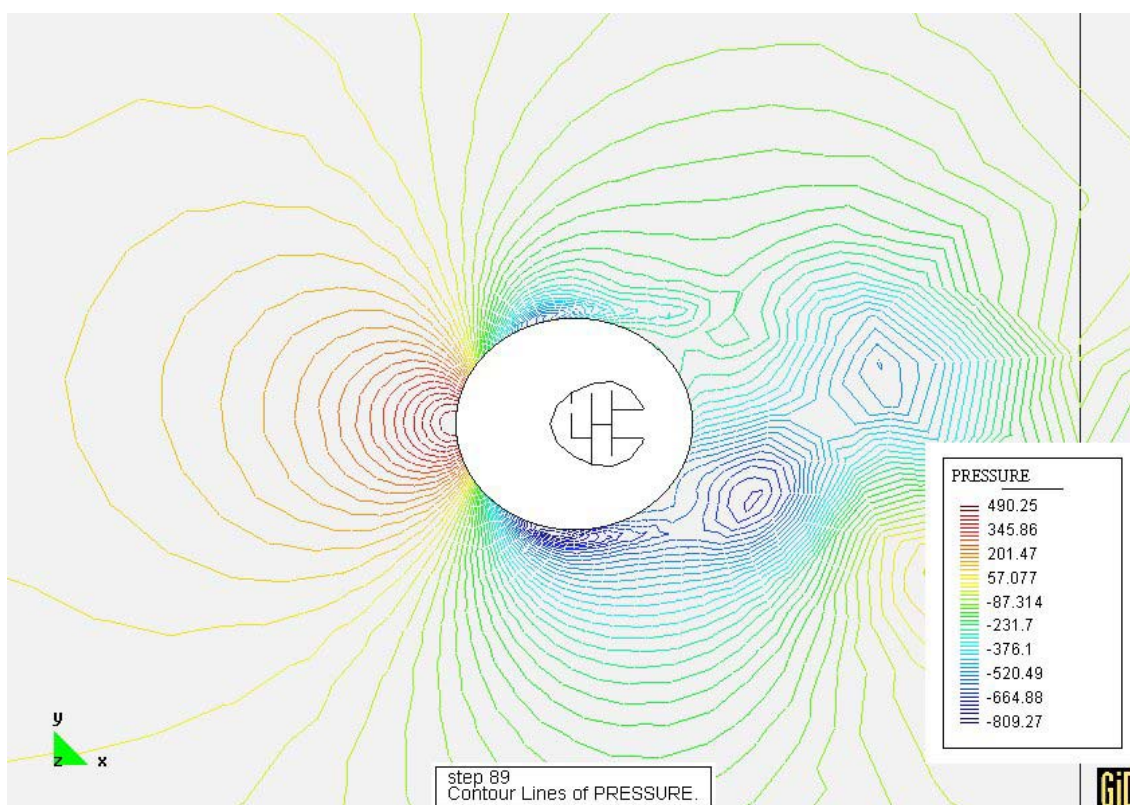


Figura 5.31: Visualització de pressió, Contour Lines.



Els resultats respecte a la velocitat del fluid, sabent que l'entrada de l'aire a 25° és de 28m/s , o sigui uns 100Km/h , es poden desglossar en la velocitat en el sentit de l'eix de les X, en de les Y i la total en un temps donat, tal com es pot veure en les següents figures:

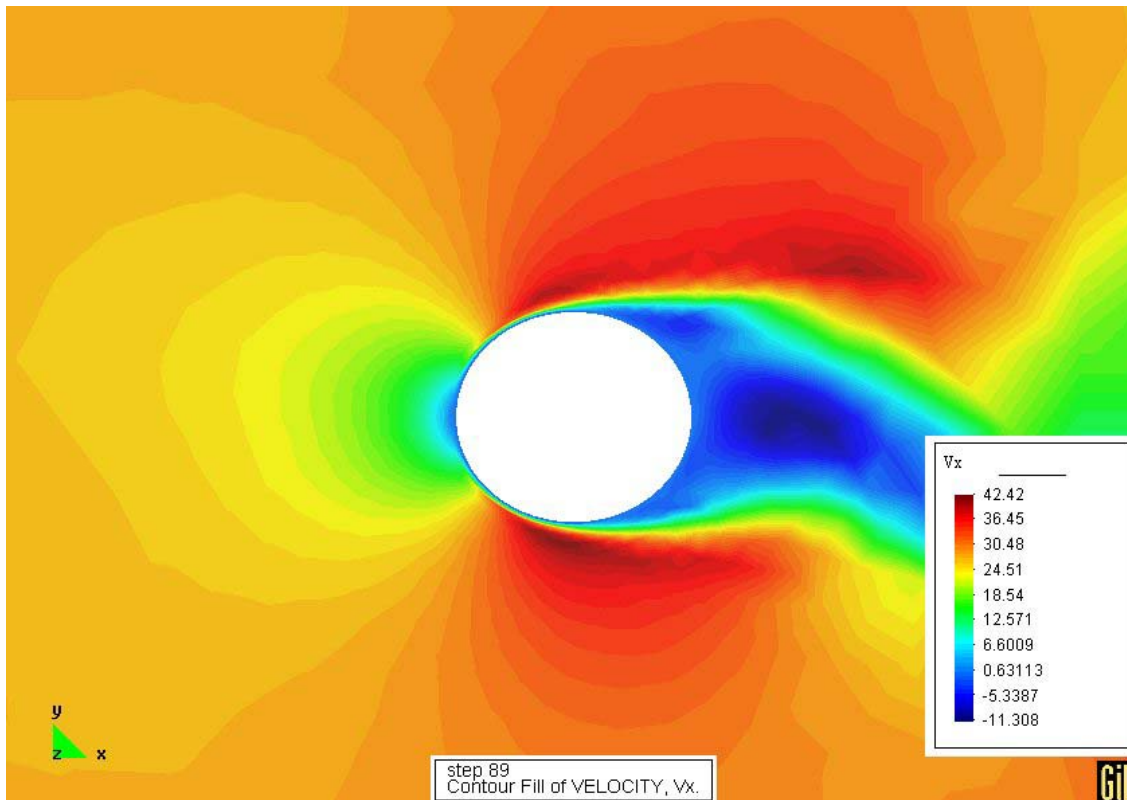


Figura 5.32: Velocitat en X, cas1.

Es pot comprobar que la velocitat en direcció X (V_x) en el punt d'estancament té valor 0. En els extrems superiors i inferiors arriba quasi a multiplicarse per dos, arribant als $42,42\text{ m/s}$. En la part posterior veiem que inclús hi ha velocitats negatives, cosa que contrasta amb les depressions abans analitzades.



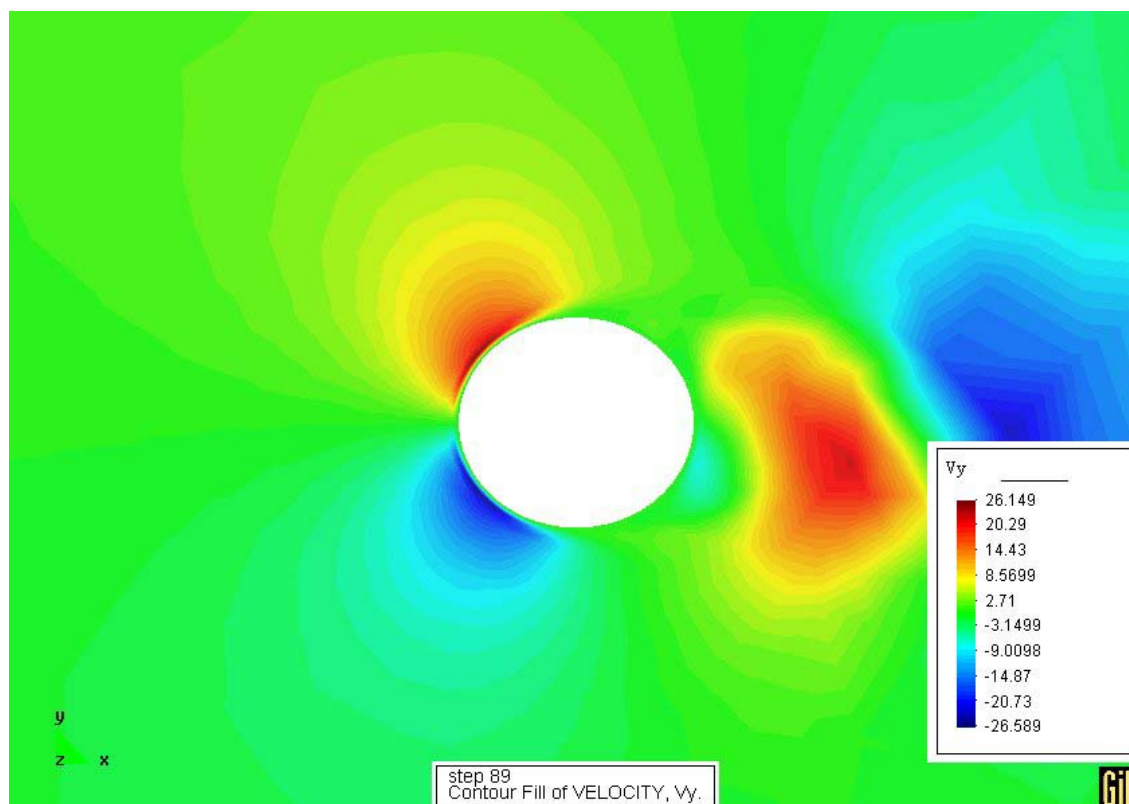


Figura 5.33: Velocitat en Y , cas1.

Respecte la velocitat V_y , varia bastant en funció del temps, ja que depèn directament per on s'estigui desprenent el fluid. A l'igual que es va desprenent el fluid de banda a banda, la velocitat també va alternant-se de signes positius a negatius.



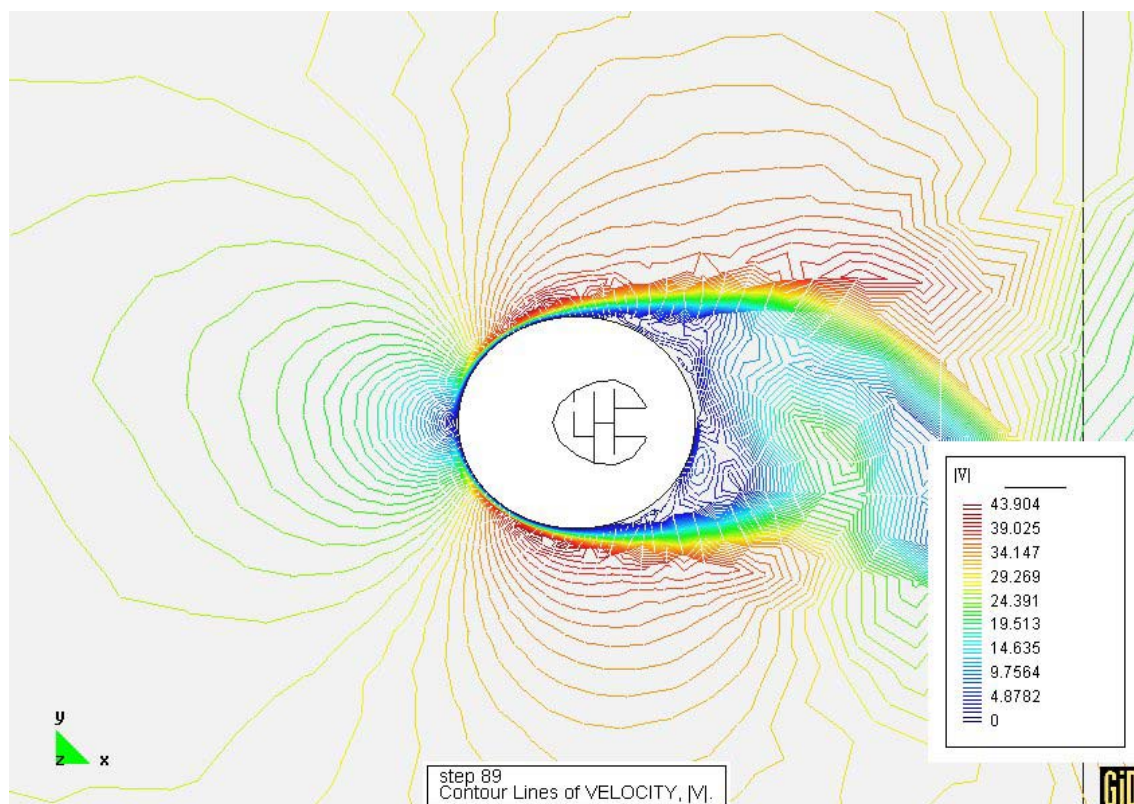


Figura 5.34: Mòdul de la velocitat, cas1.

En aquesta última figura es pot observar la distribució del mòdul de la velocitat, tenint en compte les dos components, tant la V_x com la V_y .



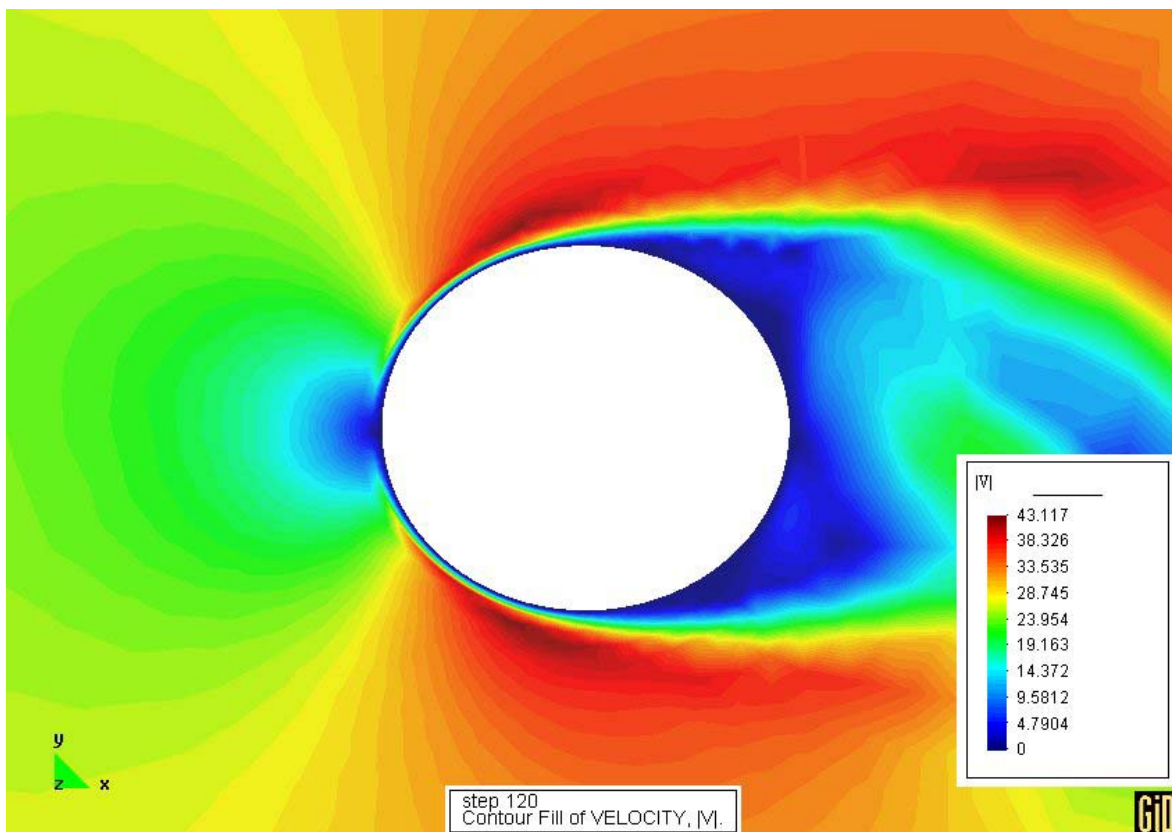


Figura 5.35: Velocitat total, cas1.

Per tal de calcular més endavant el coeficient de resistència a l'avanç, es necessita saber la integral de la pressió en tot el perímetre. Com ja s'ha explicat prèviament, s'ha creat el perímetre de la secció com una *Boundarie* per poder calcular aquesta integral. Per dur-la cal mirar la funció *Forces on Boundaires*, que retorna la integral de la pressió al voltant de la superfície abans definida.



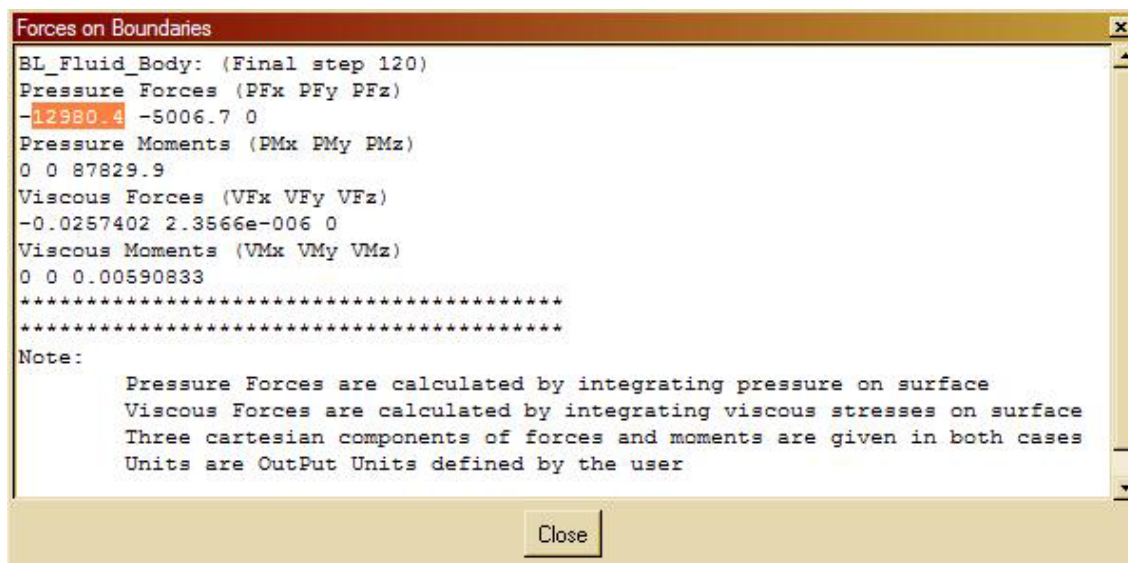


Figura 5.36: Forces on Boundaries, cas1.

Per aquest perímetre queda com a força a tenir en compte pel càlcul la marcada en taronja en la Figura 5.36: 12980,4 N.



5.11.2 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 30 graus: Cas 2

Anàlogament al punt 5.11.1 s'ha realitzat la mateixa computació, però per al perímetre inicial rotat 30 graus, amb el que no s'explicarà amb el mateix detall, doncs és el mateix del cas anterior, però amb resultats diferents. Tant en aquest cas com en els següents, la direcció del fluid no varia, continua anant paral·lela a l'eix de les X d'esquerra a dreta.

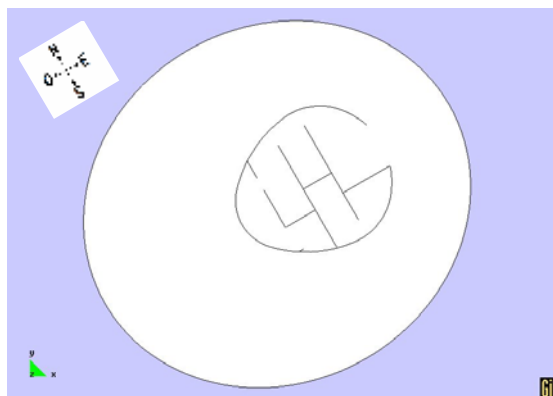


Figura 5.37: Geometria d'estudi per al cas2.

Quedant les pressions:

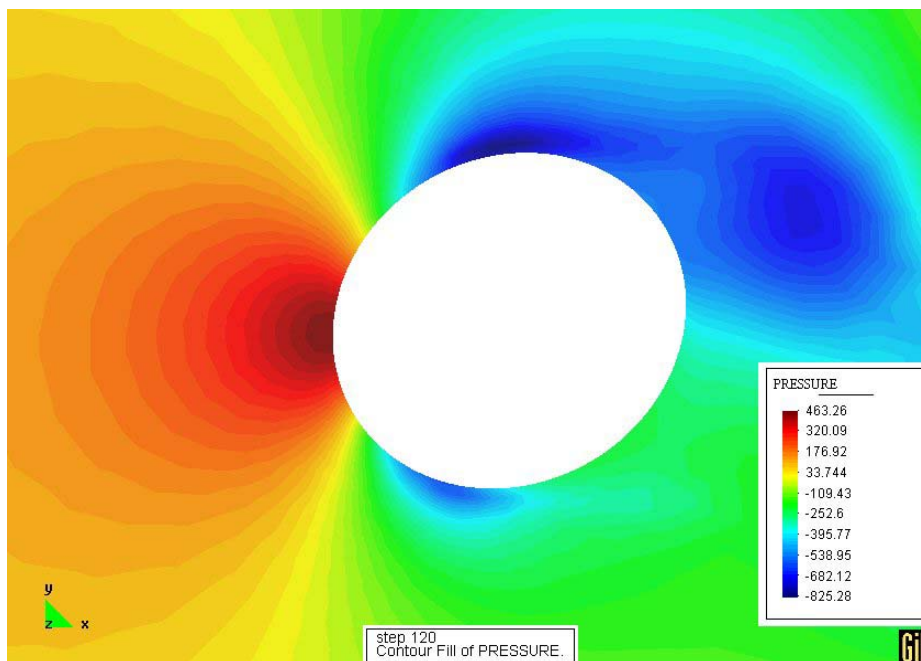


Figura 5.38: Distribució de pressions per al cas2, ampliat.



Quedant les velocitats V_x y V_{total} :

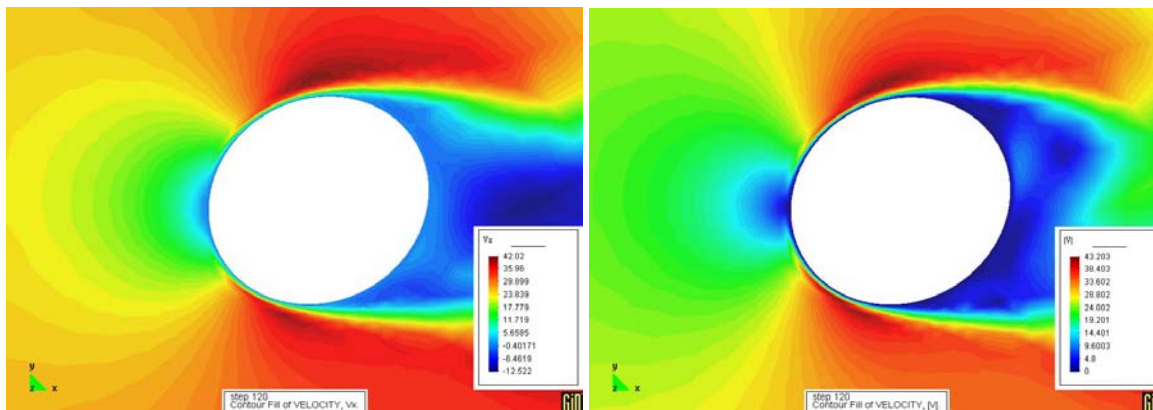


Figura 5.39: Velocitat en X i Velocitat total Mòdul de la velocitat.

Consultant les *Forces on Boundaries*:

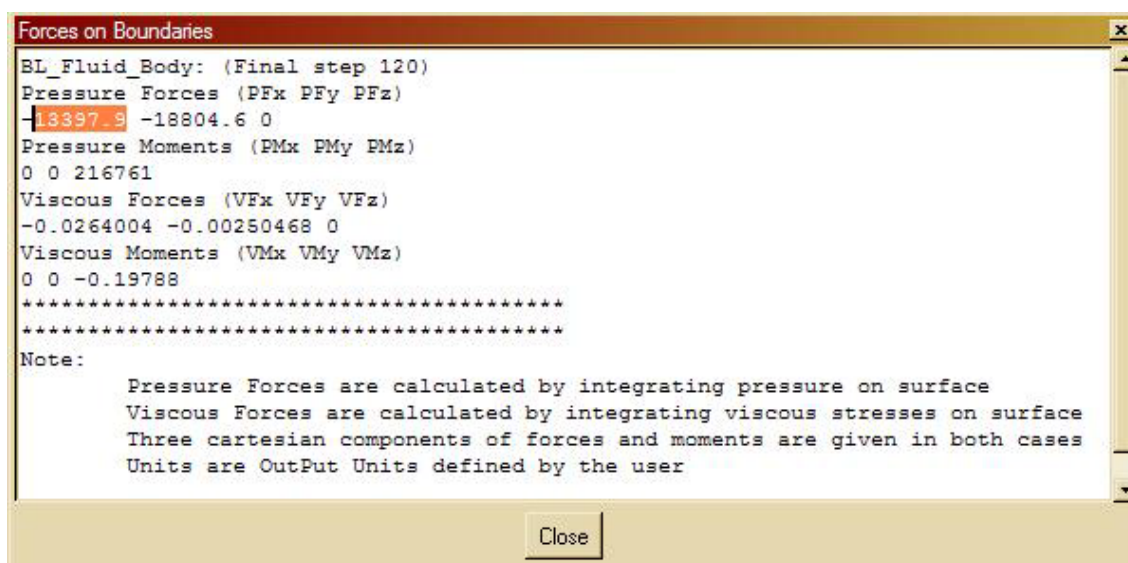


Figura 5.40: Forces on Boundaries, cas2.

Es pot veure que la integral de les forces de pressió en el perímetre rotat 30 graus, augmenta de 12980,4 fins a 13397,9 N. La qual cosa explica que si el vent incideix així, el coeficient de resistència a l'avanç serà una mica més alt.



5.11.3 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 45 graus: Cas 3

Talment al punt 5.11.1 i l'anterior s'ha realitzat la mateixa computació, però per al perímetre inicial rotat 45 graus amb la mateixa incidència del fluid, on evidentment les condicions de contorn no han variat.

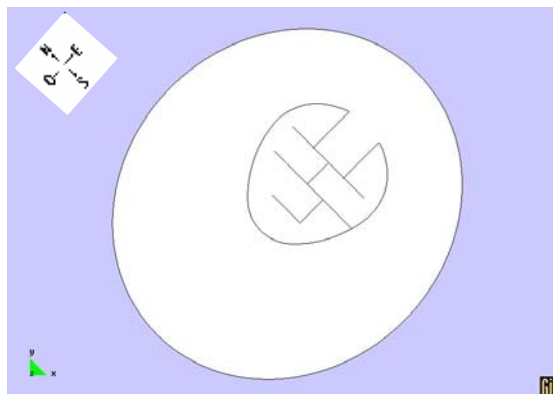


Figura 5.41: Geometria d'estudi per al cas3.

Quedant les pressions:

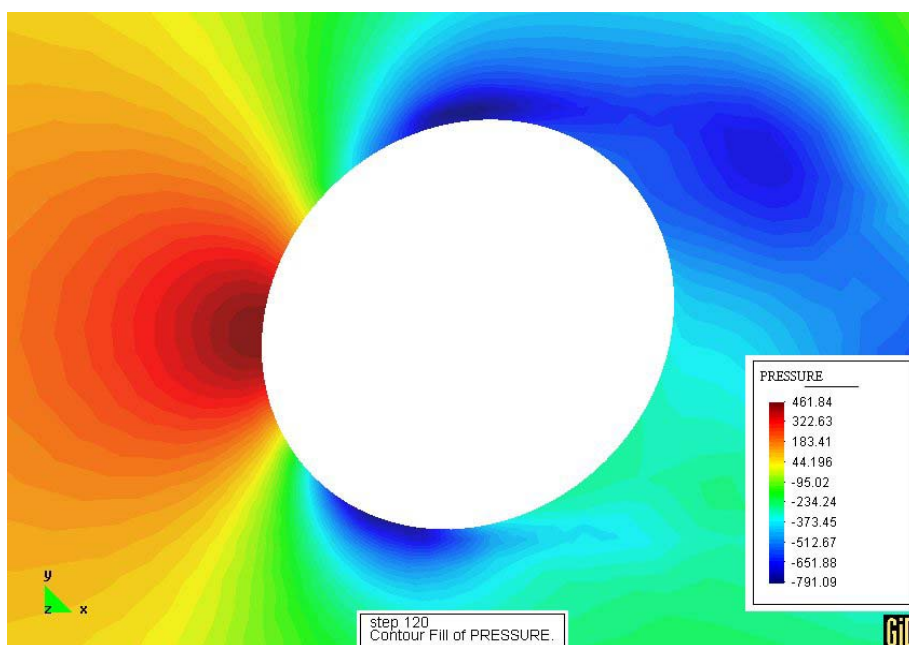


Figura 5.42: Distribució de pressions per al cas3, ampliat.



Quedant les velocitats V_x y V_{total} :

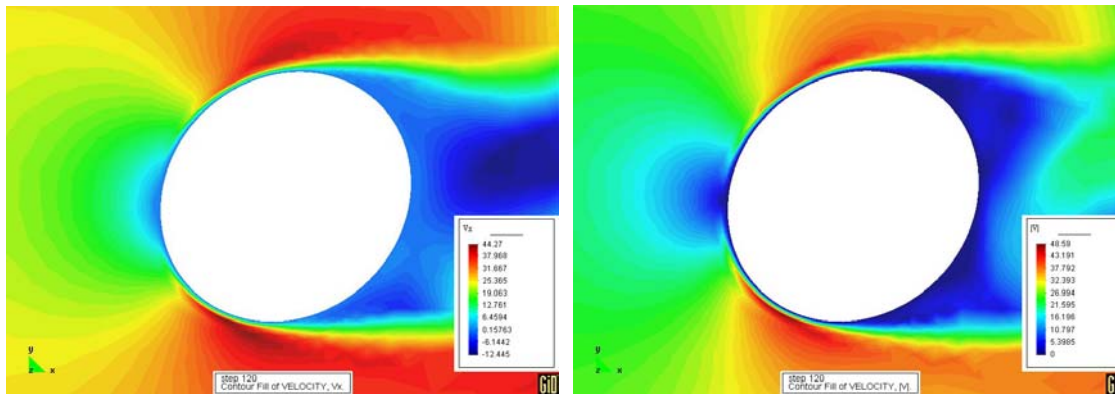


Figura 5.43: Velocitat en X i Velocitat total.

Consultant les *Forces on Boundaries*:

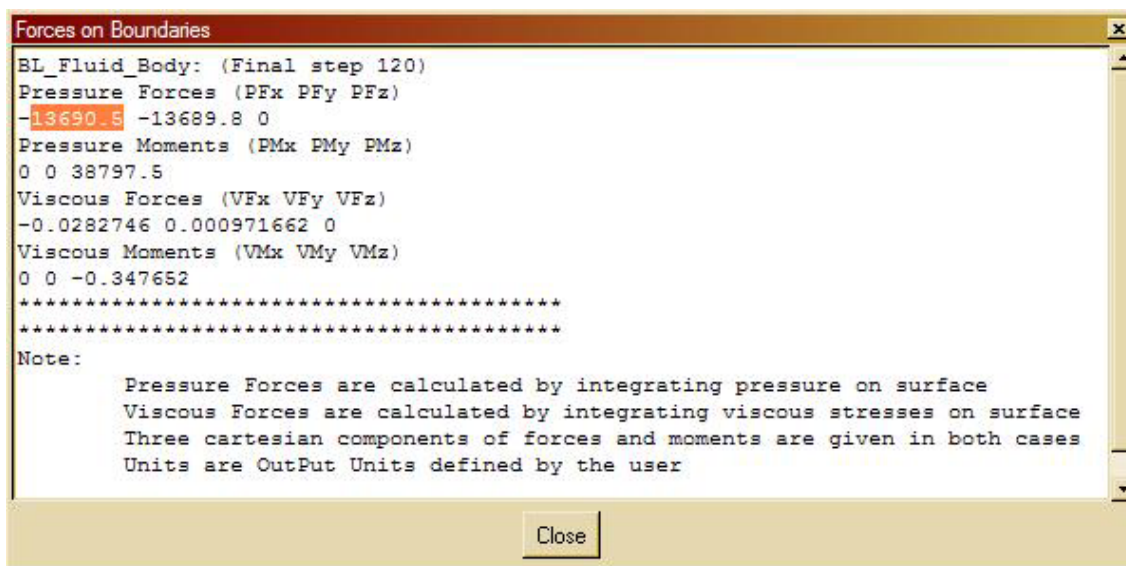


Figura 5.44: Forces on Boundaries, cas3.

En aquest cas les forces de pressió de les X, prenen el valor 13690,5 N.



5.11.4 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 60 graus: Cas 4

Igualment al punt 5.11.1 i als altres casos, s'ha realitzat la mateixa computació amb les mateixes condicions, però amb el perímetre inicial rotat 60 graus.

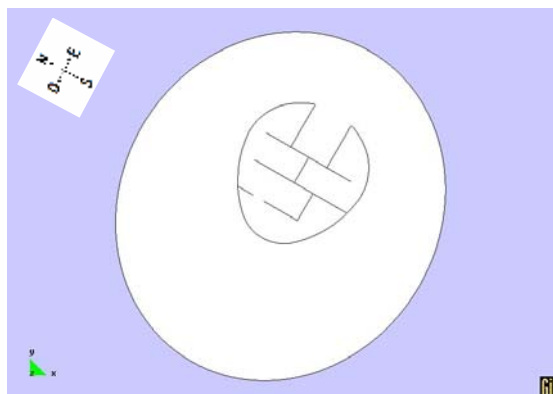


Figura 5.44: Geometria d'estudi per al cas4.

Quedant les pressions:

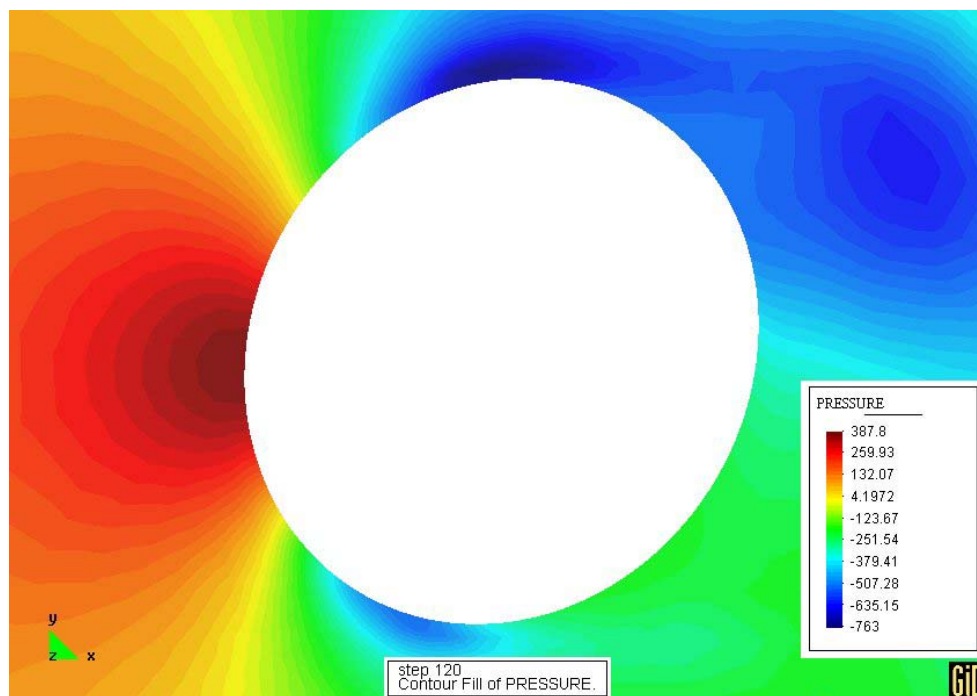


Figura 5.45: Distribució de pressions per al cas4, ampliat.



Quedant les velocitats V_x y V_{total} :

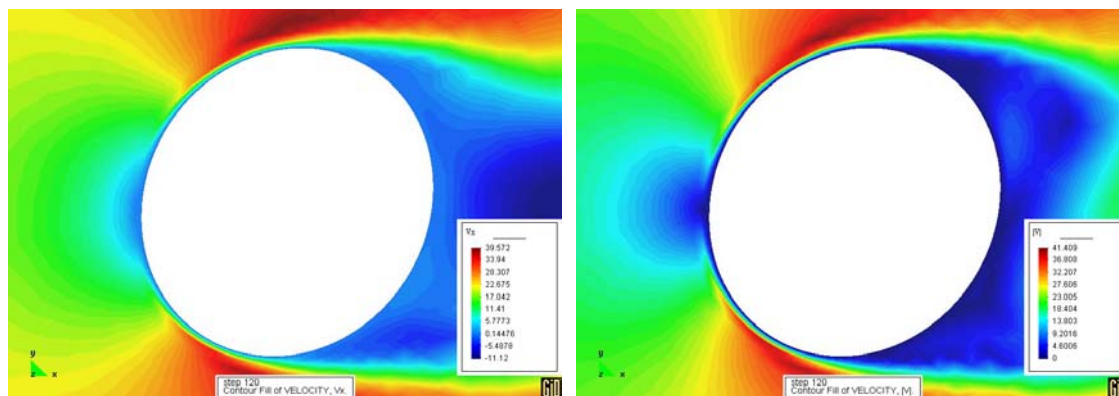


Figura 5.46: Velocitat en X i Velocitat total.

Consultant les Forces on Boundaries:

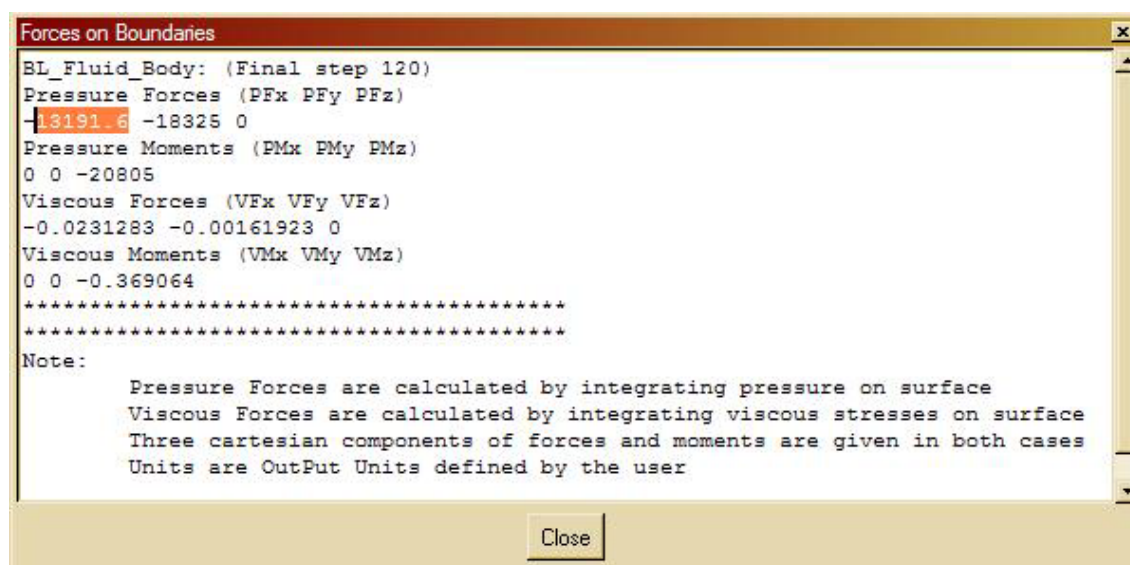


Figura 5.47: Forces on Boundaries, cas4.

En aquest cas les forces de pressió de les X, prenent el valor 13191,6 N.



5.11.5 Resultats de la simulació del perímetre inicial rotat 90 graus: Cas 5

Anàlogament al punt 5.11.1 s'ha realitzat la mateixa computació, però per al perímetre inicial rotat 90 graus.

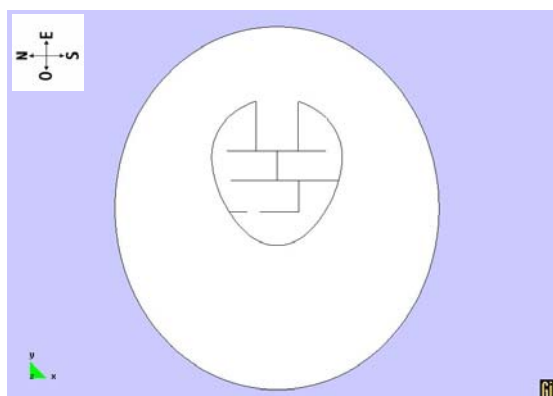


Figura 5.48: Geometria d'estudi per al cas5.

Quedant les pressions:

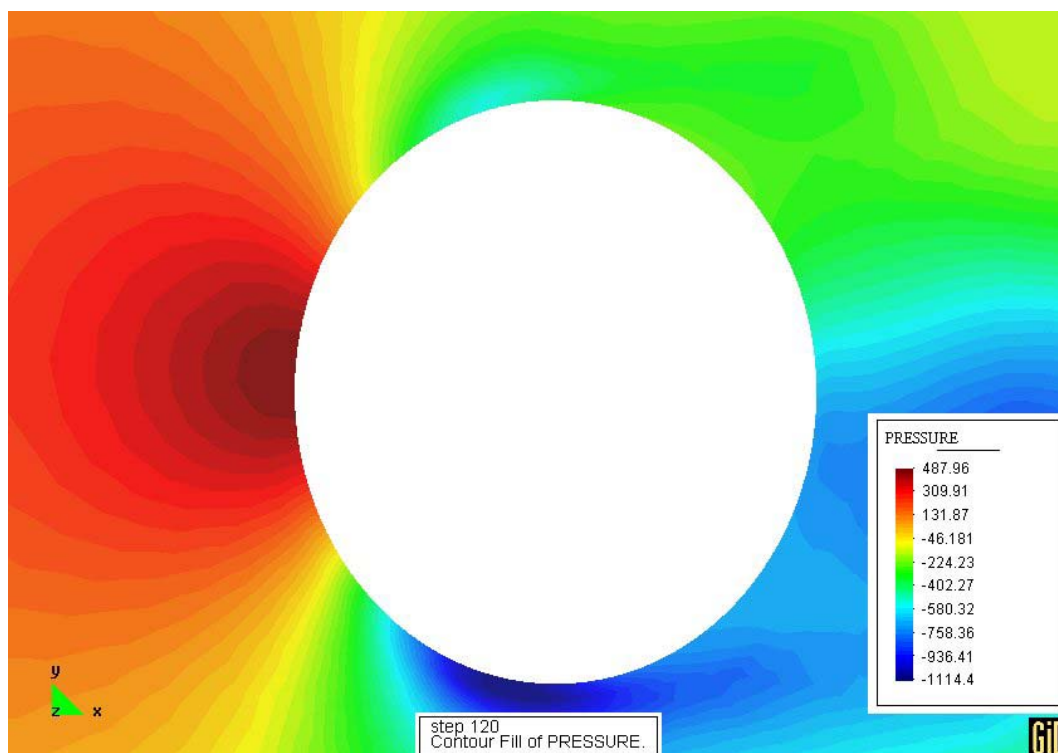


Figura 5.49: Distribució de pressions per al cas5, ampliat.



Quedant les velocitats V_x y V_{total} :

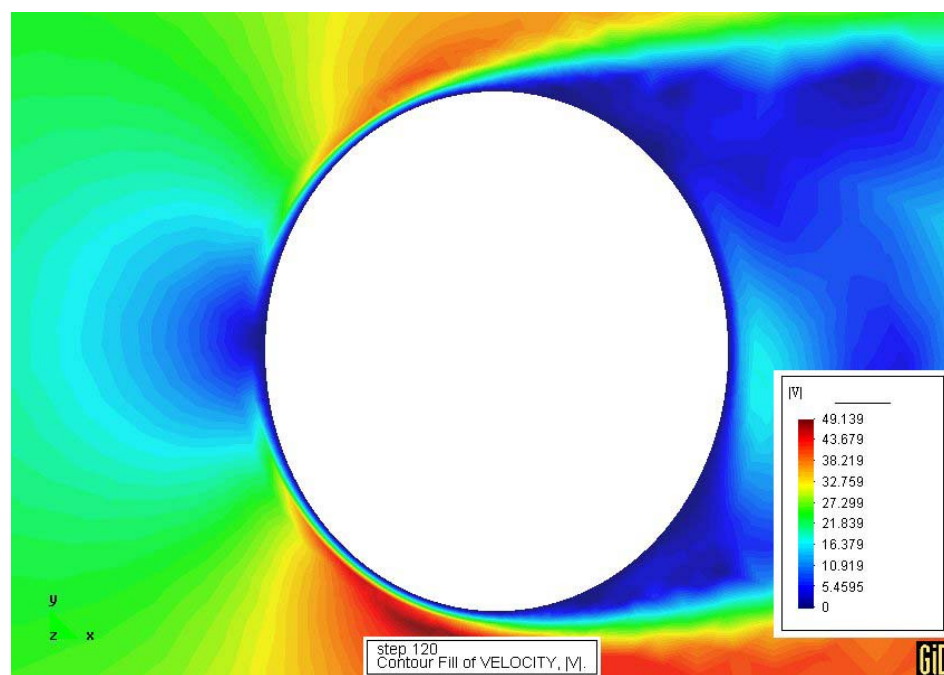
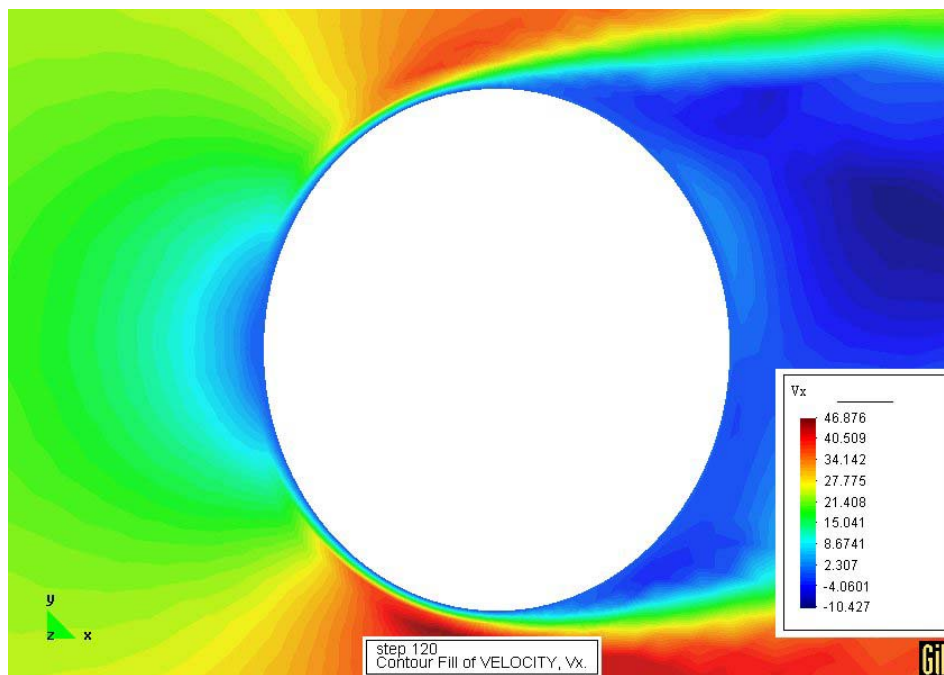
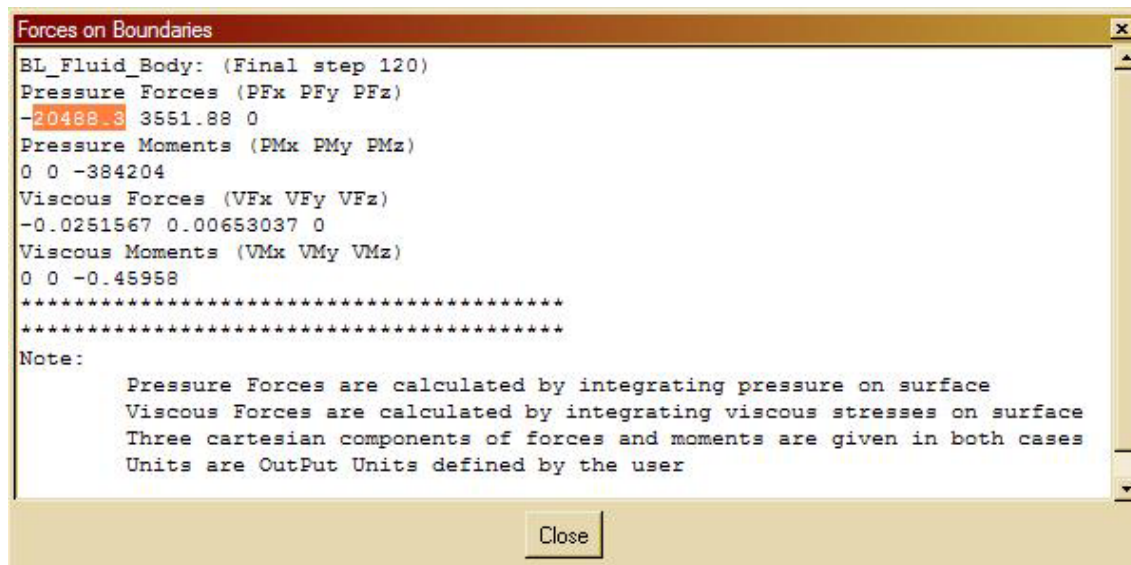


Figura 5.50: Velocitat en X i Velocitat total.



Consultant les *Forces on Boundaries*:



En aquest cas les forces de pressió de les X, prenen el valor 20488.3 N. Aquest és el valor més gran de tots els casos fins al moment mostrats. Amb el que, amb aquesta configuració (direcció per on incideix el vent, amb vent del nord), serà la de més coeficient de resistència a l'avanç. Així doncs quan el vent incideixi igual que la figura, el coeficient de resistència a l'avanç és més alt.



5.12 RESULTATS SIMULACIÓ 2D

En totes les configuracions d'incidència del vent sobre el perímetre d'estudi, s'ha integrat la pressió en aquest calculant així les forces de pressió, tal com s'ha analitzat en els darrers punts. Donant els següents resultats (en N per unitat d'àrea):

Cas 1: perímetre inicial

```
Forces on Boundaries
BL_Fluid_Body: (Final step 120)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-12980.4 -5006.7 0
Pressure Moments (PMx PMy PMz)
```

Cas 2: perímetre inicial rotat 30°

```
Forces on Boundaries
BL_Fluid_Body: (Final step 120)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-13397.9 -18804.6 0
```

Cas 3: perímetre inicial rotat 45°

```
Forces on Boundaries
BL_Fluid_Body: (Final step 120)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-13690.5 -13689.8 0
```

Cas 4: perímetre inicial rotat 60°

```
Forces on Boundaries
BL_Fluid_Body: (Final step 120)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-13191.6 -18325 0
```

Cas 5: perímetre inicial rotat 90°

```
Forces on Boundaries
BL_Fluid_Body: (Final step 120)
Pressure Forces (PFx PFy PFz)
-20488.3 3551.88 0
```



Un cop tenint aquests valors i amb les diferents àrees resistents (A) en cada cas es pot calcular el coeficient de resistència a l'avanç en 2D de la *Torre Agbar* de Barcelona, mitjançant la següent fórmula:

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho \cdot C_\infty^2 \cdot A} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

on C_d és el coeficient de resistència a l'avanç

F_d és la força de pressió per unitat d'àrea al contorn de la superfície (N)

ρ és la densitat del fluid, aire 25° (1.17 Kg/m³)

C_∞ és la velocitat del fluid (28 m/s \approx 100 Km/h)

A és l'àrea per unitat (m)

Per calcular l'àrea resistent, simplement s'ha mesurat la distància de la secció entre el punt màxim i mínim de l'eix de les Y. Així doncs, aplicant l'equació 5.8 per cada F_d i per cada A queda el següent quadre resum:

	Fd (N)	A (m2)	Pmàx (Pa)	Cd
CAS 1	12980,4	33,89	492,99	0,835
CAS 2	13397,9	34,92	463,99	0,836
CAS 3	13690,5	35,62	461,84	0,838
CAS 4	13191,6	36,84	387,6	0,78
CAS 5	20488,3	37,88	487,96	1,179

Cada cas té una àrea resistent diferent, a l'igual que té una distribució de pressions distinta. Així doncs es pot veure que en el cas que el vent incideixi en la direcció que es simula en el cas 5,



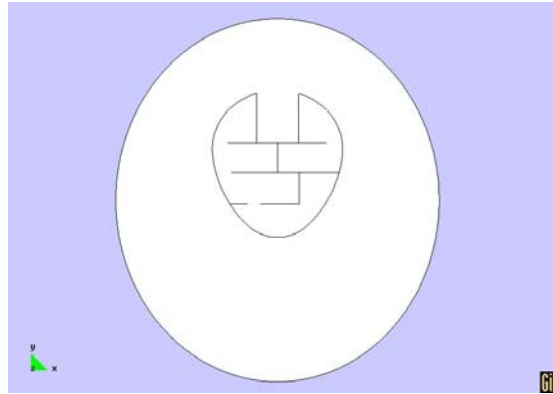


Figura 5.51: Geometria d'estudi per al cas5.

el coeficient de resistència a l'avanç és de 1,179, sent el màxim de totes les configuracions (rotacions) exposades anteriorment. Amb el que es pot dir, que en el pitjor dels casos, segons la direcció d'incidència del vent, la simulació de la secció de la *Torre Agbar de Barcelona* en 2D, pot tenir com a màxim un coeficient de resistència a l'avanç de 1,179.

Aquest valor s'ha comparat amb el cas d'una circumferència, per tal de validar els resultats obtinguts. En el llibre [5] "*Fundamentos de mecánica de fluidos*" de l'editorial *Limusa*, en la pàgina 583, en la figura 9.23, s'ha comparat el resultat del Cd obtingut en el cas 5 amb el coeficient de resistència a l'avanç d'una circumferència per al mateix nombre de Reynolds, ja que varia en funció d'aquest. Consultant aquesta gràfica (figura 9.23 del llibre), s'arriba a un coeficient de resistència a l'avanç de 1, concluint que els valors obtinguts són correctes.



6 PROVA D'UNA SIMULACIÓ EN 3D

Igualment cal comentar, que ja que s'ha elaborat la geometria en 3D, s'ha dut a terme uns càlculs en 3D, buscant el càlcul del coeficient de resistència a l'avanç total, en 3D. Però degut a les grans mides, al número tan alt de superfícies, a la dimensió del mallat, a la velocitat del fluid, etc. no s'ha arribat a cap resultat. Però tot hi no haver pogut trobar resultats, s'explicarà per sobre el procés realitzat.

6.1 CREACIÓ DE LA GEOMETRIA EN 3D

S'ha partit de la geometria inicialment creada a partir de les dades facilitades per l'empresa *b720*. Però degut a l'alt número de superfícies s'han fet diferents modificacions, per tal de tenir menys cost computacional. Així que s'han fet proves amb tres geometries en 3D diferents.

La primera és la geometria inicial:

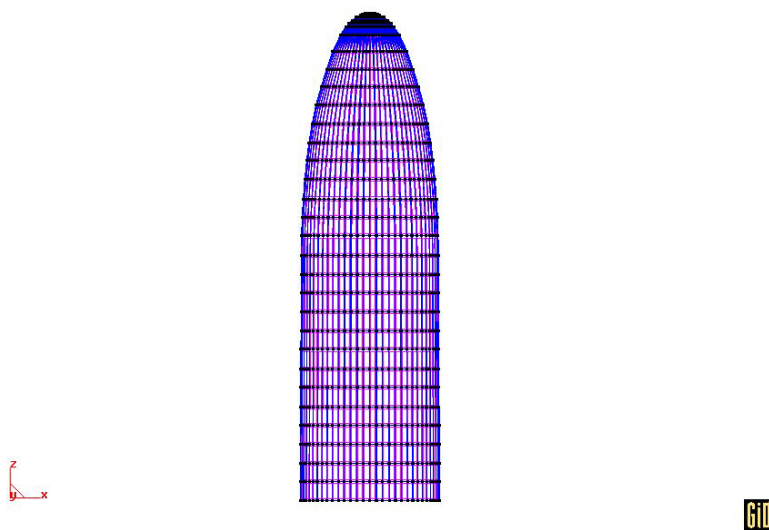


Figura 6.1: Geometria original.



La segona, és una modificació de l'original, però la part de la cúpula enlloc de tenir forma oval, s'ha simplificat amb una sèrie de superfícies circulars, eliminant unes 1500 superfícies i simplificant així les computacions, dividint així per dos el nombre de superfícies inicial.

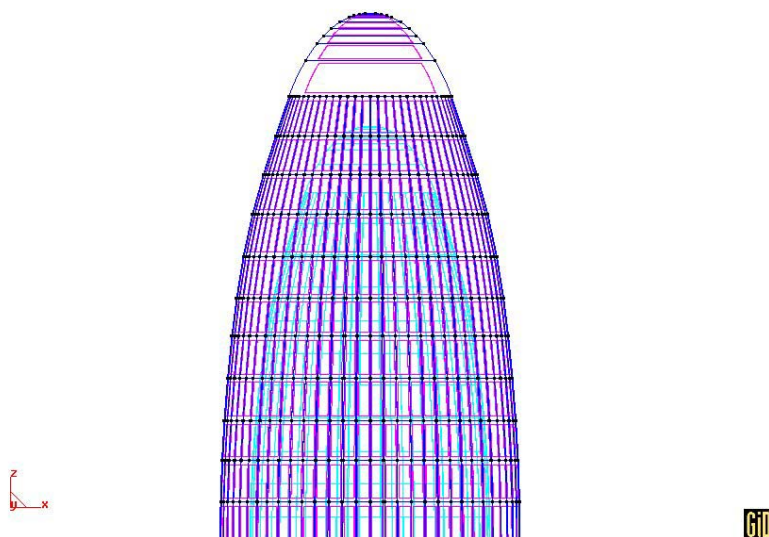
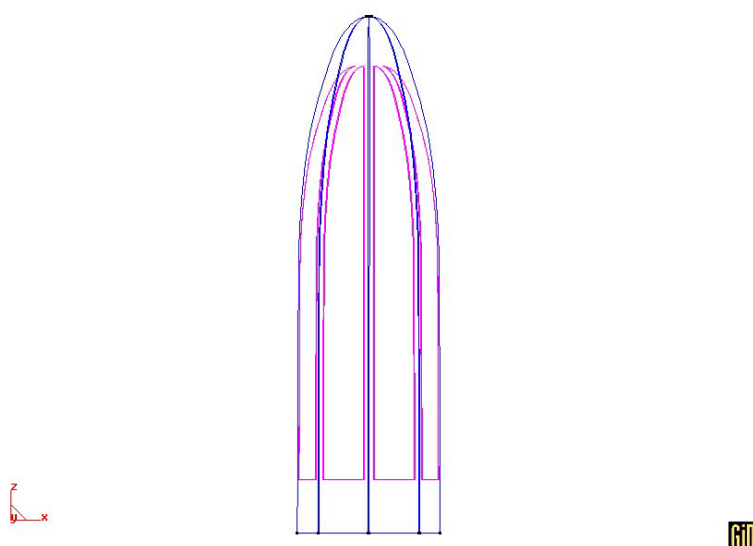


Figura 6.2: Geometria amb cúpula simplificada, amb 1200 superfícies menys que l'inicial.

Igualment aquesta variació és massa complexa i requereix un cost computacional massa alt. La tercera geometria provada ha estat composta per només 8 superfícies amb base circular en comptes d'oval:



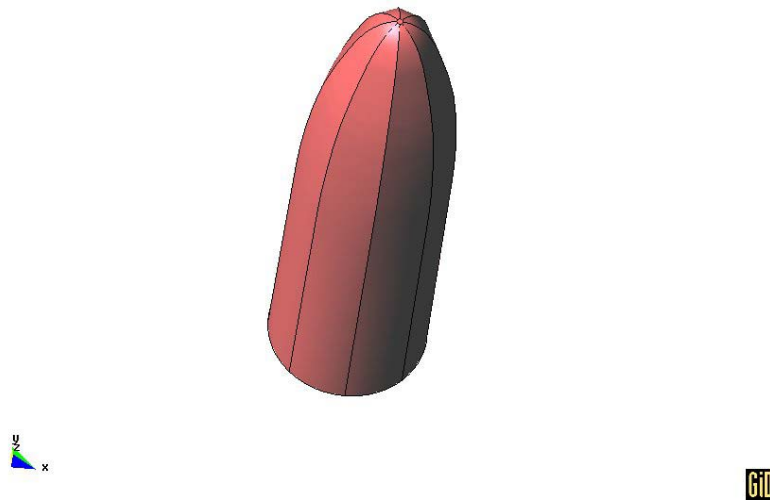


Figura 6.3: Geometria simplificada circular de 8 superfícies.

Aquesta superfície és la que menys s'assembla a la realitat, ja que la base es circular enlloc de ser oval; la cúpula també difereix respecte l'inicial. S'ha cregut que per a simplificar els càlculs i la computació seria un bon pas fer-ho amb un volum de control d'aquesta mena, tot i no haver arribat a cap conclusió o valor en concret.

6.2 PROPIETATS I COTORN DEL FLUID

Anàlogament al 2D, s'han creat dos volums que envoltin el volum de control, per tal de fer dos mallats amb densitat de nodes diferents, sent el mallat més dens al voltant del volum de control i el menys dens a l'exterior. A partir d'ara totes les figures estaran basades en la geometria anterior simplificada amb 8 superfícies de base circular.



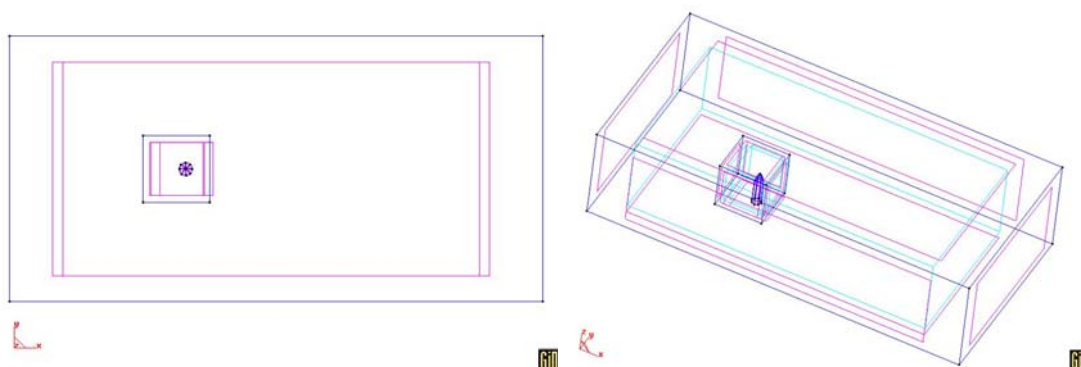


Figura 6.4: Geometria completa.

En aquesta geometria també s'han aplicat anàlogament al 2D una sèrie de condicions de contorn:

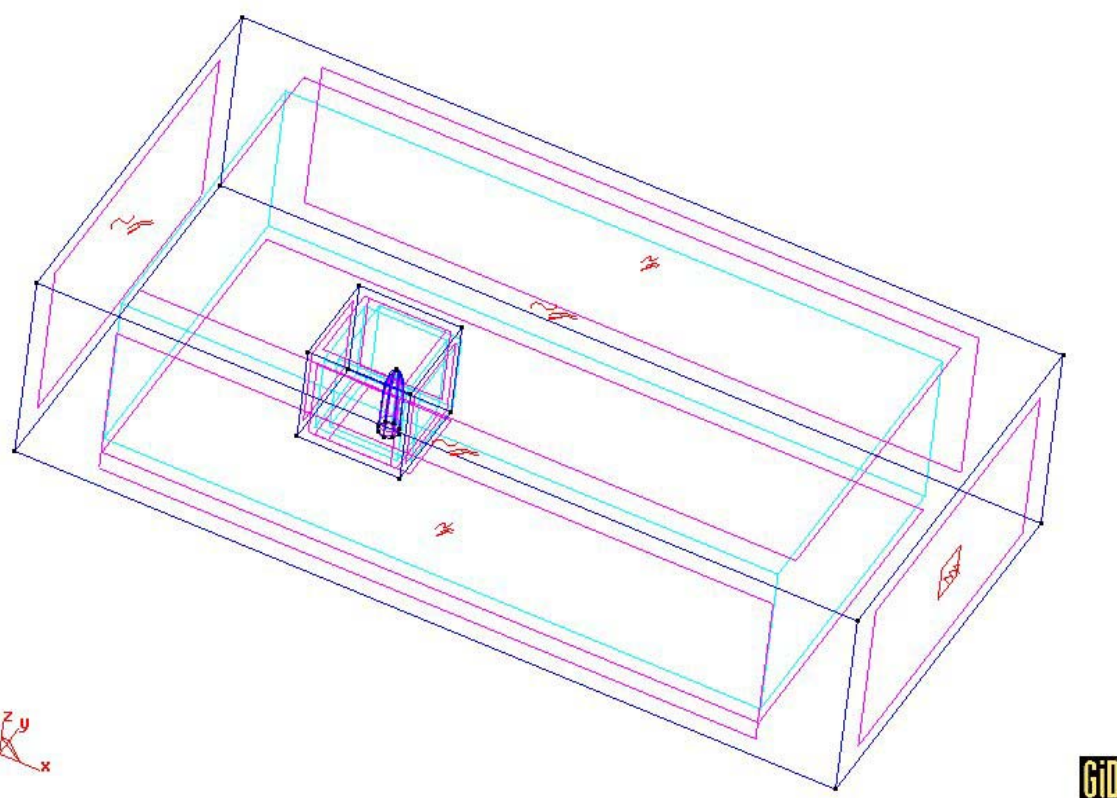


Figura 6.5: Condicions de contorn.



En la figura anterior es pot veure que s'ha aplicat pressió nul·la a la superfície més extrema (a l'esquerra), velocitat en X, Y i Z en la superfície inicial (a la dreta) i velocitat en X i Y en la resta de superfícies externes.

També s'ha definit el volum del fluid i la superfície del contorn del fluid, tal com mostra la següent figura:

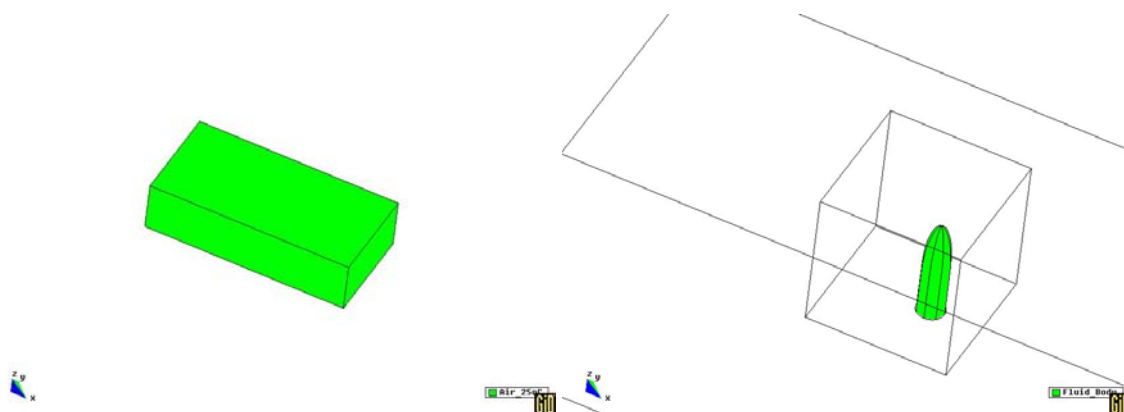


Figura 6.6: Air 25°C i Fluid Body



6.3 GENERACIÓ DE LA MALLA EN 3D

El mallat s'ha provat també de diferents maneres, amb diferents densitats, etc. En aquest apartat es s'exposen dos dels utilitzats i provats.

Mallat de baixa densitat:

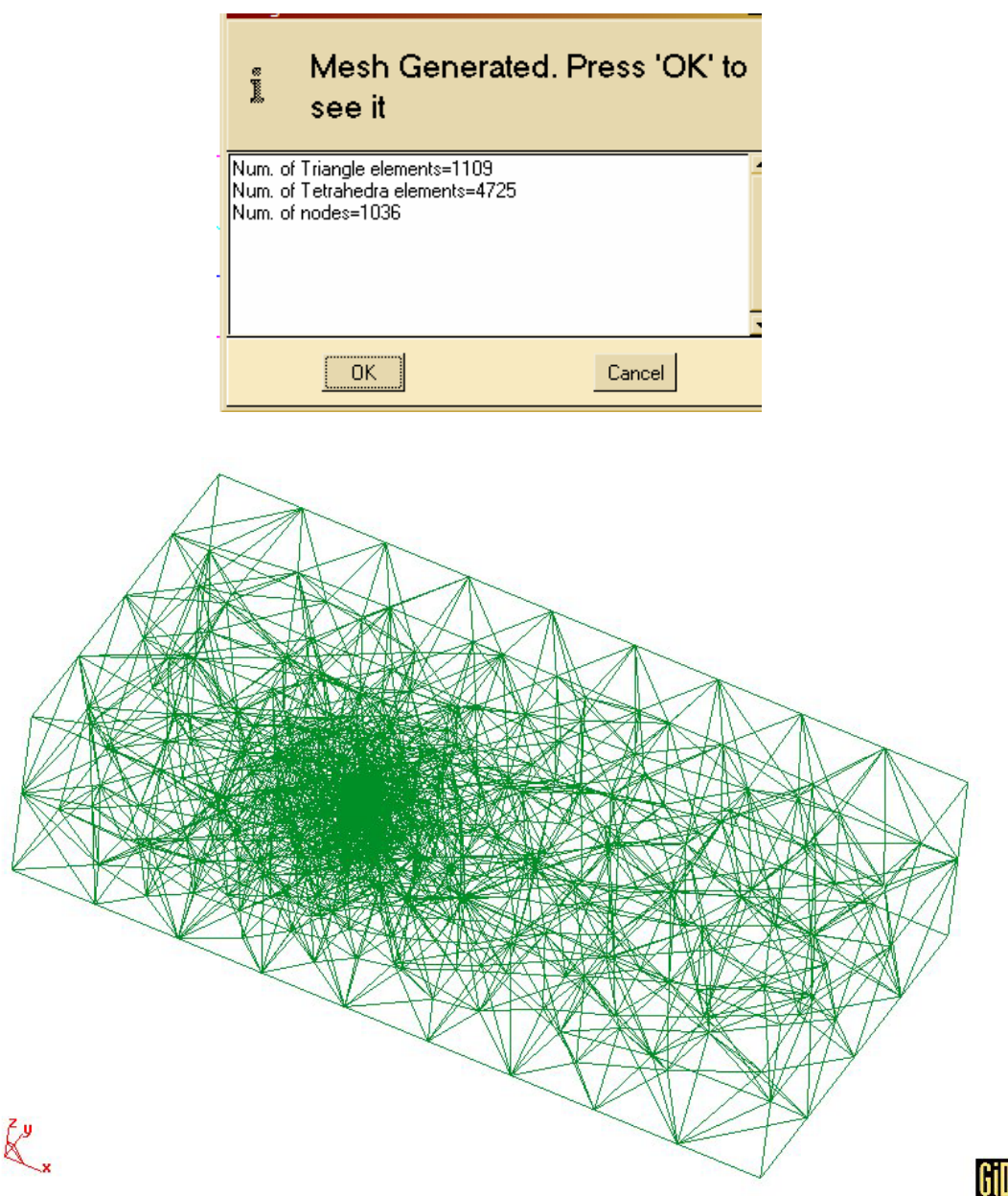


Figura 6.7: Mallat de baixa densitat.



Mallat d'alta densitat:

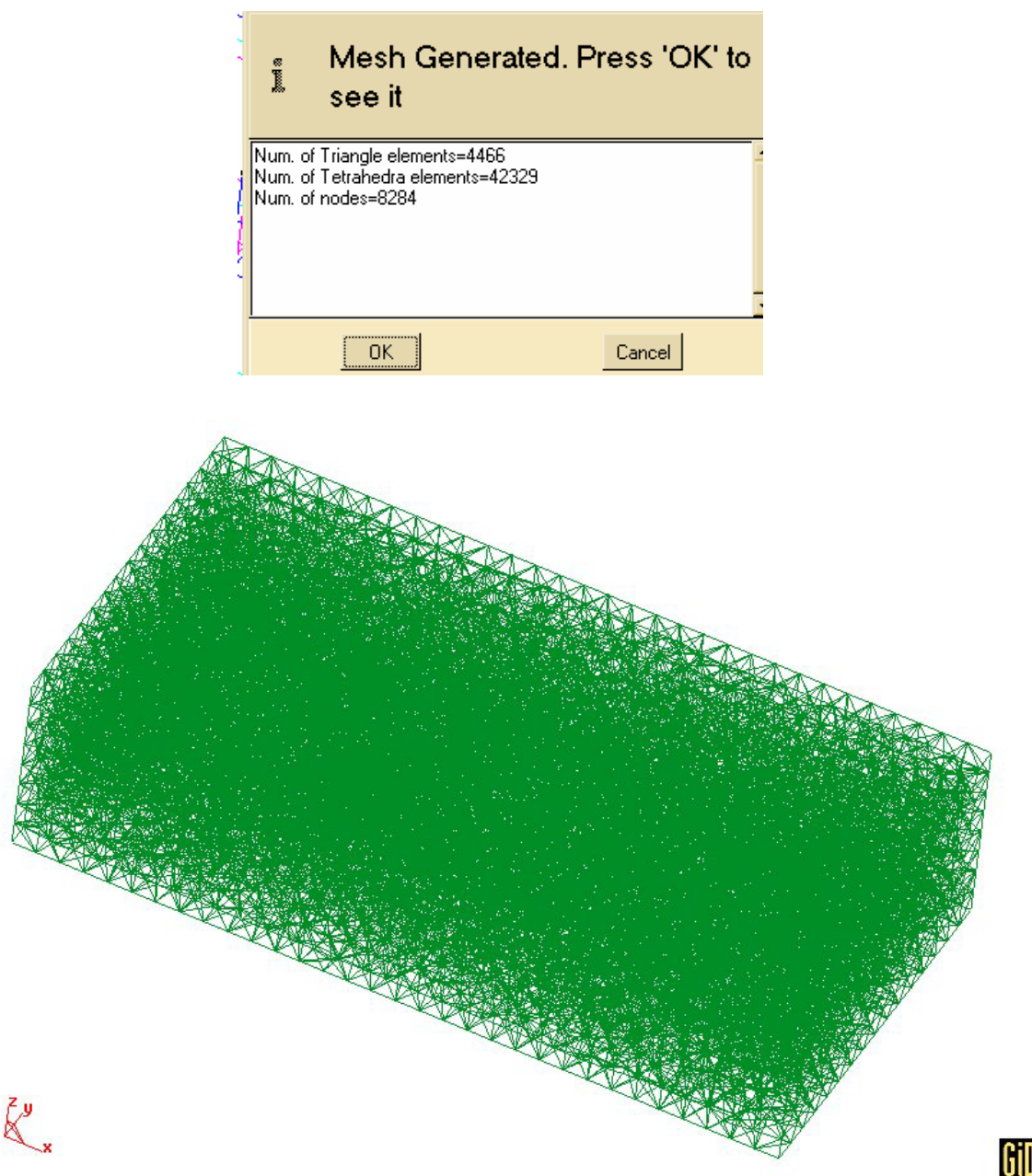


Figura 6.8: Mallat d'alta densitat.

Com es pot comprovar el nombre de nodes (uns 8000) i d'elements (uns 46000) en aquest mallat és elevadíssim i calcular, per mètode iteratiu, aquesta quantitat de nodes fa que l'ordinador no suporti aquesta càrrega i avorti el càlcul o no doni un resultat coherent.



6.4 RESULTATS OBTINGUTS EN 3D

S'han fet moltes més proves a les exposades en aquest punt, tant referent a diferents geometries, tamany, volums de control diferents, velocitats del fluid diferents, mètodes de càlcul, etc., sense poder arribar a cap resultat coherent. Si el mallat és massa fi, el programa arriba a resultats erronis i no fiables. Si pel contrari s'agafen mallats massa densos, el desgast computacional és massa elevat, no podent arribar a veure cap resultat (tot i esperar hores a que acabin les computacions).

Així doncs cal esmentar que no s'ha arribat a cap resultat satisfactori, tot hi haver-se intentat de diverses formes.

Per arribar a un resultat satisfactori, respecte al coeficient de resistència a l'aire, es pot fer mitjançant la semblança, creant un model en miniatura i dur a terme els càlculs necessaris al túnel de vent.

Aquí hi ha un exemple d'una distribució de pressions obtinguda amb un dels mallats. Com es pot apreciar, es tracta d'una distribució de pressions errònia i no correcta. Ni els valors de pressions són coherents, ni la mateixa distribució és correcta, ja que en el punt d'estancament s'hauria d'apreciar la pressió màxima i no al inici. Tampoc es pot observar cap tipus de desprendiment dels vòrtex etc.



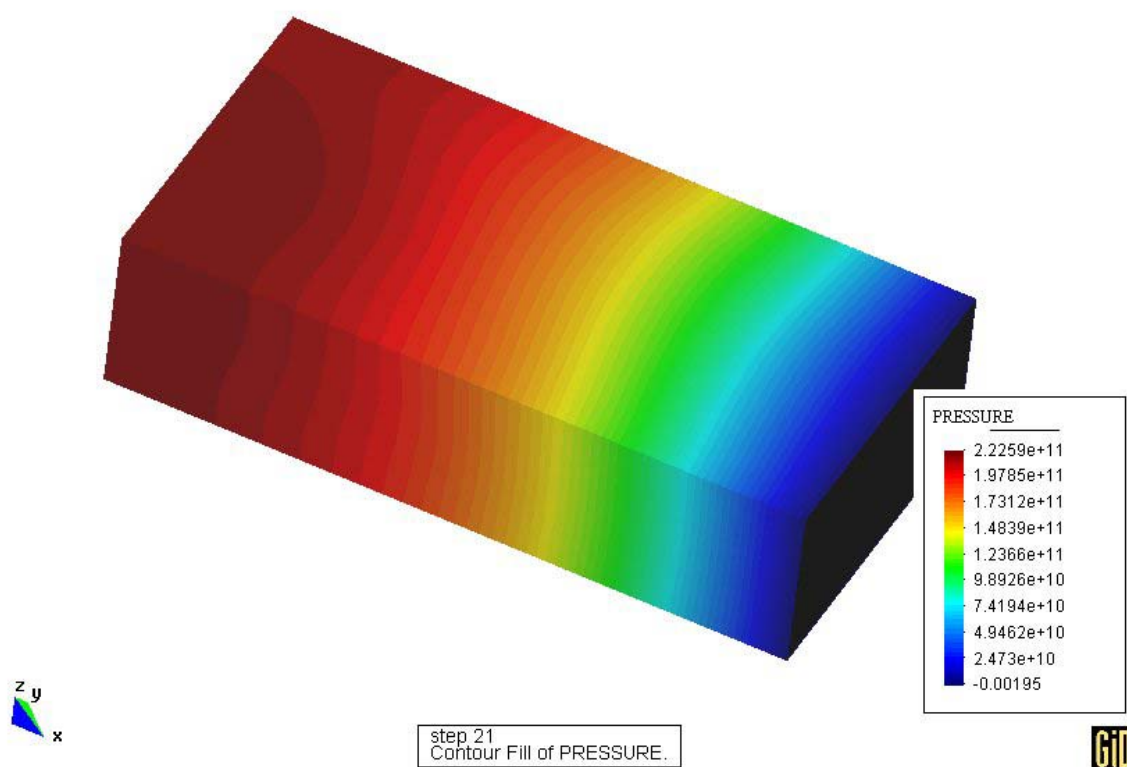


Figura 6.9: Resultats erronis d'una de les simulacions en 3D.





7 PRESSUPOST

Aquest pressupost és una valoració econòmica de tot l'estudi realitzat, que es desglossarà en tres parts a fi i efecte de que sigui el més clar possible:

- Disseny de geometria.
- Simulació numèrica.
- Redacció del projecte.

El *Disseny de la geometria* contempla:

Tota la recollida de dades de la *Torre Agbar de Barcelona*, la cerca del programa de simulació, la cerca de la geometria de la lluminària, la cerca de la geometria de la *Torre* i l'anàlisi i interpretació d'aquestes.

La *Simulació numèrica* contempla:

El preprocés i preparació de la computació en *Tdyn* i *GiD*, de totes les geometries emprades, hores de CPU en computació en *Tdyn*, postprocés de totes les geometries emprades i anàlisi dels resultats.

La *Redacció del projecte* contempla la redacció, l'enquadernació i la presentació d'aquest estudi.

Cal comentar, que l'amortització dels programes *Tdyn* de simulació computacional i la del programa *Solid Works*, està inclosa en el pressupost com a preu hora de PC 30€/h. Igualment, un punt a tenir en compte és que s'ha aplicat la tarifa d'enginyer en formació també de 30€/h i no la d'un enginyer sènior.



	Hores d'enginyer	Cost en €
DISSENY GEOMETRIA		
Recollida de dades	50	1500
Cerca de la geometria d'estudi	100	3000
Anàlisi i interpretació	40	1200
TOTAL disseny geometria		5700
SIMULACIÓ NUMÈRICA		
Preprocés i preparació de la computació en Tdyn 2D	200	6000
Hores de CPU en computació en Tdyn	230	6900
Postprocés i anàlisi de resultats	150	4500
TOTAL simulació numèrica		17400
REDACCIÓ DEL PROJECTE		
Material	-	60
Hores de redacció	150	4500
TOTAL redacció del projecte		4560
TOTAL PRESSUPOST		27660

Taula 7.1: Pressupost desglossat

Concepte	Cost en €
DISSENY GEOMETRIA	5700
SIMULACIÓ NUMÈRICA	17400
REDACCIÓ DEL PROJECTE	4560
TOTAL PRESSUPOST	27660

Taula 7.2: Termes principals del pressupost.



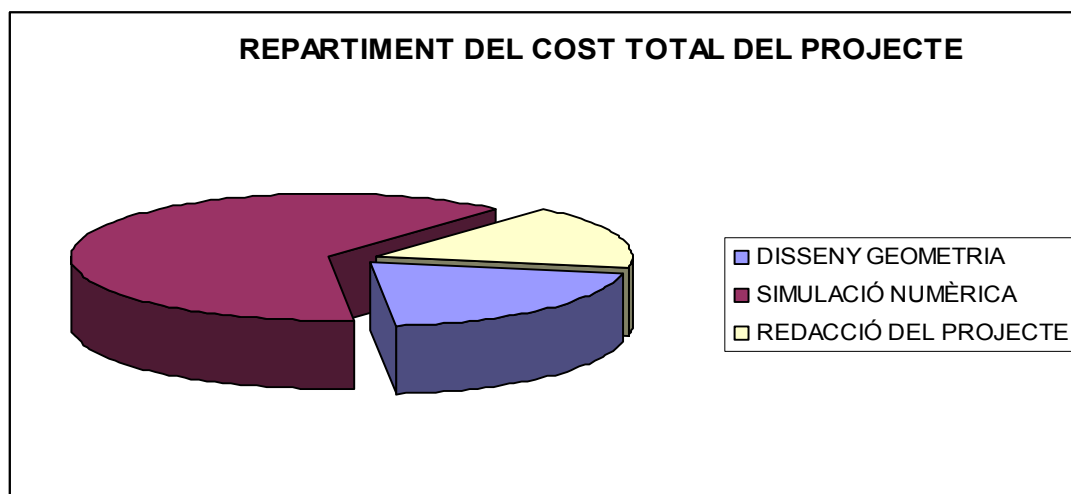


Figura 7.1: Pressupost desglossat.





CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

S'han assolit tots i cada un dels objectius inicialment proposats. S'ha realitzat un estudi aerodinàmic en 2D, calculant el coeficient de resistència a l'avanç i s'han analitzat les diferents distribucions de pressió al perímetre d'estudi per diferents configuracions d'incidència del vent.

Per als diferents angles d'incidència del vent estudiats, es pot veure que s'assoleix una pressió i un C_d màxim per al cas 5, arribant al valor de 488 Pa en el punt d'estancament. En aquest cas 5 coincideix que el vent ve directament del Nord. Precisament a Barcelona, les puntes de vent més altes venen del Nord (amb una màxima de 90Km/h al 1994). Així doncs es pot dir que l'orientació de la *Torre Agbar de Barcelona* no és bona, ja que tot el perímetre exterior és de làmines de vidre amb el risc que això comporta.

Segons els tècnics de l'empresa *Jean Nouvel* i *b720*, encara no s'ha realitzat cap estudi similar al d'aquest projecte. Fins ara només s'han fet estudis parcials referents a les làmines de vidre en quant a vibracions i sorolls amb un vent determinat, però no se n'ha fet cap estudi en el camp estacionari.

Com a recomanacions, s'hauria d'haver orientat la *Torre Agbar de Barcelona* de diferent manera, per tal de minimitzar les pressions sobre les làmines de vidre amb vent del Nord. L'orientació que hagués minimitzat la pressió màxima en el punt d'estancament és la mateixa que en el cas 4, on es troba una pressió màxima 100 Pa inferior a la orientació actual. Evidentment ja no s'hi pot fer res, però crec que un càlcul, com el realitzat en aquest projecte, hagués sigut necessari realitzar-lo abans de la construcció per reduir possibles deformacions de l'estructura exterior que aguanta les làmines de vidre, així com per estalviar molts diners en forma de materials per a aquesta estructura. El càlcul de la estructura que subjecta aquestes làmines ha hagut de ser superior, degut a la mala orientació de la *Torre Agbar*.

Un edifici d'aquestes característiques ha de tenir el mínim risc d'accidents, ja que tractant-se de vidre a la superfície exterior, la ruptura d'una làmina pot ser fatídica pels vianants i pot



desprestijiar, per complert tota l'obra. La pressió a suportar per aquesta estructura que aguanta les làmines, hagués estat millor amb una altra orientació. Precisament es pot dir que l'orientació, que té actualment desde el punt de vista de pressió a suportar per l'estructura que aguanta les làmines exteriors, és de les pitjors orientacions possibles.

Com a última recomanació, caldria fer una crida a trobar una solució experimental complerta en 3D en un túnel de vent de prou dimensió, per poder-lo utilitzar amb una maqueta prou gran i on poder tenir en compte l'efecte del terra, el despreniment de la capa límit i els remolins formats a la cúpula.



AGRAÏMENTS

En aquest apartat s'agraeix, molt especialment, als senyors *Julio García* i *Ramón Ribó* de l'empresa *COMPASS Ingeniería y Sistemas S.A.* per les hores dedicades i l'ajut prestat, sense ells no s'hagués pogut arribar cap dels resultats obtinguts.

Per altra banda també s'ha d'agrair a l'empresa *b720*, per cedir les dades de la geometria original de la *Torre Agbar de Barcelona*.





BIBLIOGRAFIA

Llibres

- [1] GERHART, P.; GROSS, R.; HOCHSTEIN, J; “Fundamentos de Mecánica de Fluidos”. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington, 1995.
- [2] SOLIDWORKS; “Guía Práctica”, Centre Cim 2001.
- [3] TDYN; “Reference Manual Tdyn”, Compass Ingeniería y Sistemas Barcelona 2002.
- [4] VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY; “Applied Fluid Dynamics Handbook”; 1984.
- [5] “Fundamentos de mecánica de fluidos”; Limusa; 1999.

Pàgines Web

- <http://www.cfd-online.com/> (Web de programes de simulació de fluids)
- <http://www.numeca.be/> (Web de programes de simulació de fluids)
- <http://www-waterloo.ansys.com/cfx/> (Web de programes de simulació de fluids)
- <http://www.compassis.com/> (Web de programes de simulació de fluids)
- <http://gid.cimne.upc.es/> (Web de programes de simulació de fluids)
- http://www.layetana.com/torreagbar/cs_agbar.htm (Web relacionada amb *Torre Agbar*)
- <http://www.waternunc.com/esp/Agbar07.htm> (Web relacionada amb *Torre Agbar*)
- <http://www.iespana.es/legislaciones/agbar.htm> (Web relacionada amb *Torre Agbar*)
- http://www.arch.info/key/_torre+agbar (Web relacionada amb *Torre Agbar*)
- <http://www.jeannouvel.fr/> (Web relacionada amb *Torre Agbar*)
- http://www.greatbuildings.com/architects/Jean_Nouvel.html (Web relacionada amb *Torre Agbar*)



<http://proyectando.com.ar/noticia/notic401.htm> (Web relacionada amb *Torre Agbar*)

<http://concretonline.com/jsp/articulos/construccion29.jsp> (Web relacionada amb *Torre Agbar*)

<http://www.bcn.es/> (Web relacionada amb *Torre Agbar*)

<http://www.efluids.com/> (Web de programes de simulació de fluids)

<http://www.copro.org/> (Web de programes de simulació de fluids)

